

VŠB—Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Monitorování hladiny kapaliny
Liquid Level Monitoring

2017

Martin Koláček

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Kolářek**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612R003 Aplikovaná elektronika
Téma: Monitorování hladiny kapaliny
Liquid Level Monitoring
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te rozbor metod monitorování výšky hladiny kapalin s ohledem na jejich fyzikálních vlastnosti.
2. Na základě vytipované metody navrhnete a realizujete zařízení pro monitorování hladiny vody.
3. Ověřte funkčnost realizovaného vzorku a proved'te měření dle pokynů vedoucího závěrečné práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího závěrečné práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry





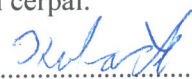
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 28.4.2017


.....

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce **Doc. Ing. Petru Palackému, Ph.D.** za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této práce.

Abstrakt

Účelem této bakalářské práce je vyvinout funkční prototyp zařízení pro monitorování hladiny kapaliny. Práce se skládá ze tří částí.

Teoretického rozboru několika způsobů principů měření hladiny kapaliny. Vlastní konstrukce měřicího zařízení a jeho teoretický rozbor, který je průběžně ověřovaný pomocí simulací v programu OrCAD. Poslední část se zabývá kalibrací sondy a ověřovacím měřením stavu hladiny.

K realizaci zařízení byla vybrána kapacitní metoda. Pro tuto metodu byla navržena sonda určená pro měření hladiny elektricky vodivých kapalin.

Klíčová slova

Hladinový snímač, Kapacitní snímač, Simulace zapojení, OrCAD,

Abstract

The purpose of this Bachelor's thesis is to develop a Prototype device, that is used for liquid level monitoring. The Thesis is composed of three parts.

The theoretical part shows Analysis of many Methods, that are used for liquid level monitoring. The empirical part is construction of measure device and its theoretical analysis. It is continuously verified by using simulations in programme OrCAD. The last part deals with probe calibration and verification's measurement of liquid level.

To implement this device has been selected the capacitive method. A probe, that is determinated to measure the level of electrically conductive liquids, has been devised for this method

Key words

Level sensor, Capacity sensor, Simulation of wiring, OrCAD

Obsah

Obsah.....	1
Seznam použitých symbolů.....	2
Seznam použitých zkratk.....	2
Seznam ilustrací a seznam tabulek.....	3
1 Úvod.....	4
2 Měření hladiny kapaliny.....	5
2.1 Nespojité měření hladiny	6
2.2 Mechanické měření hladiny (spojité měření)	7
2.3 Kapacitní metoda [5].....	7
2.3.1 Měřicí metoda kapacity Wienův můstek [7]	10
2.3.2 Měřicí integrační metoda kapacity	10
2.4 Vodivostní hladinoměry [5]	11
2.5 Ultrazvukové hladinoměry [5]	12
2.6 Hydrostatické hladinoměry	13
3 Realizace měření hladiny kapaliny.....	14
3.1 Zdrojová část [2]	15
3.2 Měření a zpracovávání signálu ze sondy.....	16
3.2.1 Oscilátor	17
3.2.2 Převodník frekvence na napětí [4].....	20
3.2.3 Sčítací obvod	23
3.3 Zobrazení hladiny pomocí stupnice[5].....	24
3.4 Konstrukce sondy	25
4 Kalibrační měření.....	27
4.1 Kalibrace sondy.....	27
4.2 Proměření sondy.....	27
5 Závěr	31
6 Literatura	32
7 Přílohy	33

Seznam použitých symbolů

a	[m]	Poloměr elektrody válcového kondenzátoru
b	[m]	Poloměr elektrody válcového kondenzátoru
c	[m.s ⁻²]	Rychlost zvuku
C	[F]	Kapacita
d	[m]	Šířka dielektrika
D	[m]	Poloměr dielektrika
E	[V.m ⁻¹]	Intenzita elektrického pole
ε_0	[F.m ⁻¹]	Permitivita vakua
ε_r	[F.m ⁻¹]	Relativní permitivita
f	[Hz]	Frekvence
h	[m]	Výška hladiny
i	[A]	Proud
I_{LED}	[A]	Proud LED diody
l	[m]	Výška hladiny
L_{MAX}	[m]	Maximální výška hladiny
Q	[C]	Náboj
R	[Ω]	Odpor
S	[m ²]	Plocha desek kondenzátoru
T	[s]	Perioda
τ	[s]	Časová konstanta
U	[V]	Napětí
U_H	[V]	Šířka hystereze
U_{SAT}	[V]	Saturační napětí
Z	[Ω]	Impedance

Seznam použitých zkratek

μC	Microcontroller	6
LED	Light Emitting Diode	24
OZ	Operační zesilovač	17
PC	Personal Computer	6
PLC	Programmable Logic Controller.....	6

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Seznam ilustrací

2-1 Měření hladiny pomocí plováku [8]	5
2-2 Měření dvou hraničních hladin vodivostní metodou [8].....	6
2-3 Mechanický hladinoměr [5].....	7
2-4 Princip kapacitního snímače s proměnnou permitivitou, nevodivé kapaliny [5].....	8
2-5 kapacitní sonda pro vodivé kapaliny [5]	9
2-6 Wienův můstek [7].....	10
2-7 Spojité měření hladiny vodivostním snímačem [5]	11
2-8 princip ultrazvukového hladinoměru metodou "Time of flight"[5]	12
2-9 Hydrostatické hladinoměry pro uzavřené a otevřené nádrže [5]	13
3-1 Blokové schéma.....	14
3-2 Schéma zdrojové části [2].....	15
3-3 Průběh napětí na jednotlivých prvcích zdrojové části	16
3-4 Oscilátor.....	17
3-5 Změna kapacity sondy	18
3-6 Ověření saturačního napětí	18
3-7 Graf průběhu oscilátoru na výstupu 1 a na výstupu 7.....	19
3-8 Převodník frekvence na napětí.....	20
3-9 Směr proudů při nabíjení kondenzátorů.....	20
3-10 Proudů v jednotlivých větvích	21
3-11 Zobrazení vstupu a výstupu z převodníku frekvence na napětí.....	22
3-12 Zvlnění napětí na výstupu z převodníku	23
3-13 Sčítací obvod.....	23
3-14 Zobrazení hladiny	24
3-15 konstrukce sondy	25
3-16 Vyobrazení válcového kondenzátoru [6]	25
4-1 Záznam z měření snímače o délce 25 cm	28
4-2 Záznam z měření snímače o délce 42 cm	30

Seznam tabulek

4-1 Tabulka měření snímače o délce 25 cm.....	27
4-2 Tabulka měření snímače o délce 42 cm.....	29

1 Úvod

Úkolem této práce je zhotovit a popsat měřicí zařízení pro měření hladiny kapaliny. Problematika měření hladiny kapaliny má několik zejména konstrukčních úskalí. Proto se hodí pro každou aplikaci jiná metoda měření od přímých až po nepřímé.

Vhodnost měřicí metody se odvíjí také od povahy měřené kapaliny. V této práci se budeme zabývat běžně vyskytující vodou obohacenou o minerály.

Cílem této práce je popsat měřicí metody hladiny kapaliny a realizovat měřicí sestavu jako funkční zařízení vhodné pro měření hladiny kapaliny v přesnosti deseti dílků.

V dalších kapitolách je rozpracováno.

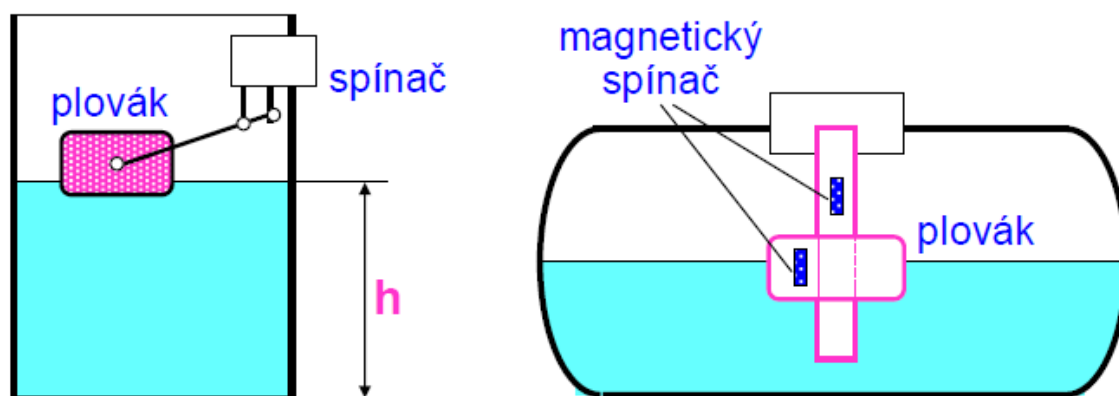
2. kapitola úvod do různých metod měření hladiny kapaliny.

3. kapitola konstrukce měřidla pomocí kapacitní metody, popis jednotlivých součástí a pomocí programu OrCAD simulace zapojení.

4. kapitola je zaměřená na kalibrační měření zařízení a zkouška sondy.

2 Měření hladiny kapaliny

Měření hladiny kapalin lze realizovat několika způsoby. V zásadě se rozlišují 2 způsoby na spojitá a nespojitá měření. Podle aplikace se můžeme rozhodnout, jestli chceme signalizovat nějakou úroveň hladiny, nebo potřebujeme znát aktuální stav hladiny.

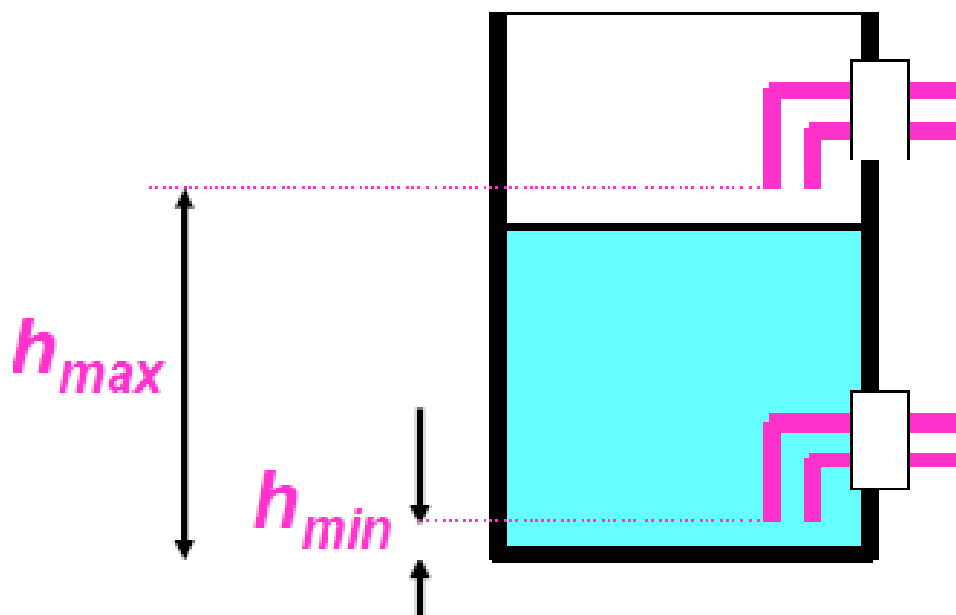


2-1 Měření hladiny pomocí plováku [8]

Jako nespojité měření hladiny může být příklad plovákových spínačů, kde mechanická konstrukce s plovákem a spínačem signalizuje určitou hladinu kapaliny (Na obrázku 1 vlevo). Na obrázku 1 vpravo je mechanická sestava plováku s toroidním magnetem a magnetickým jazyčkovým relé uvnitř trubky. Lze také realizovat konstrukci s více jazyčkovými relé a signál dále zpracovávat do analogového, nebo digitálního výstupu.

Metody měření se mohou také rozdělit z hlediska použití na přímé a nepřímé měření. Přímým měřením si můžeme představit měření pomocí plováku (viz obrázek 1). Mezi nepřímé metody řadíme například měření pomocí změny kapacity sondy, nebo pomocí změny tlaku.

2.1 Nespojité měření hladiny



2-2 Měření dvou hraničních hladin vodivostní metodou [8]

Jako nespojité měření hladiny může být použití snímače jednotlivých konkrétních úrovní hladiny, nebo krajní meze včetně bezpečnostních úrovní.

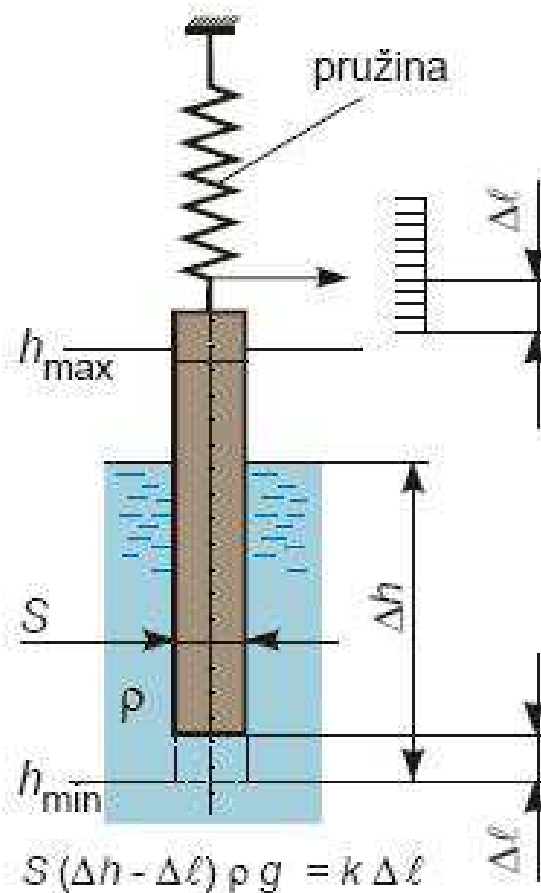
Pro nespojité měření jsou vhodné různé typy snímačů podle aplikace. Např. vhodným způsobem, jak indikovat přítomnost kapaliny je kapacitní snímač.

Mechanické měření hladiny vyobrazené na obrázku 2—1 je složeno z plováku a spínače. Touto metodou můžeme jednoduchým způsobem indikovat hraniční stavy hladiny kapaliny.

Výhody: Jednoduché zpracování signálu v digitální podobě. V případě vyhodnocení pomocí μC , PC, PLC není třeba vyhodnocovací jednotky.

Nevýhody: Pouze informace o stavu, přítomnosti kapaliny.

2.2 Mechanické měření hladiny (spojité měření)



2-3 Mechanický hladinoměr [5]

Mechanické měření hladiny si můžeme představit jako konstrukční sestavu plováku uchyceného na pružině.

Při zvyšování hladiny se bude měnit mechanická síla na pružině, která se může dále zpracovávat jako funkce přetvoření tenzometru, nebo by mohl být volný konec spojen s jezdcem potenciometru a vyhodnocoval by se proměnný odpor potenciometru.

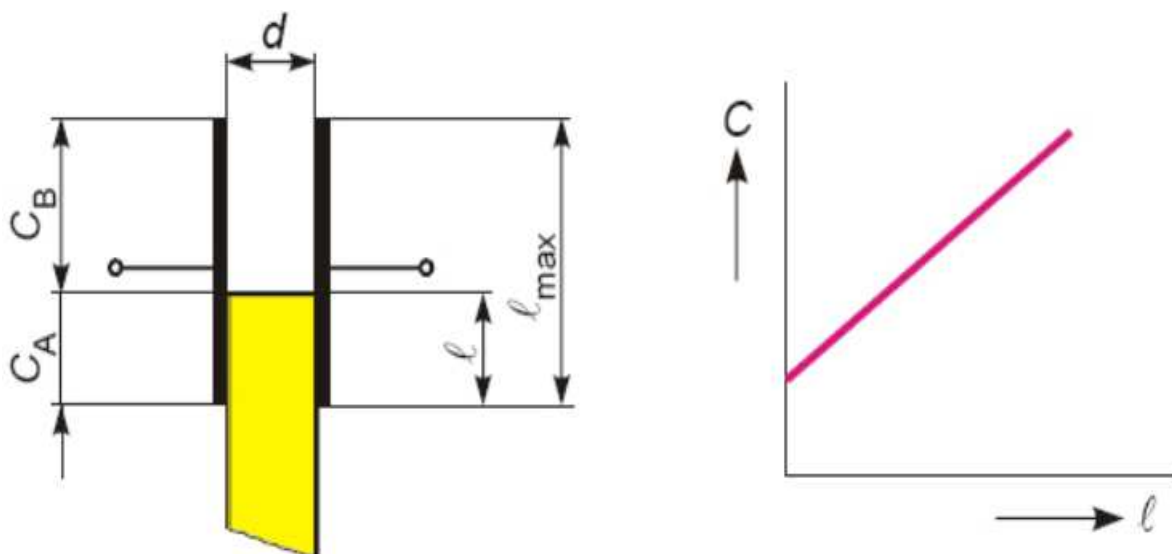
Výhody: Jednoduchý princip. Levné řešení plováku

Nevýhoda: Nutnost převodu síly na elektrickou veličinu pro další zpracování.

2.3 Kapacitní metoda [5]

Kapacitní metoda spočívá ve změně kapacity sondy. Sonda může být konstrukčně vytvořena jako kondenzátor s proměnným prvkem. Existují tři způsoby změny parametru kondenzátoru vhodné pro kapacitní snímače.

Změna tloušťky dielektrika, kde se elektrody od sebe vzdalují a přibývá další vrstva dielektrika). Změnou plochy dielektrika, kdy se dielektrikum vysouvá z kapacitoru. Toto je znázorněno na obrázku 2—2. Nevodivá kapalina vniká mezi elektrody a tvoří dielektrikum.



2-4 Princip kapacitního snímače s proměnnou permitivitou, nevodivé kapaliny [5]

Výsledná kapacita lze vyjádřit jako součet dvou kapacit. Okamžitá kapacita je tedy složena z kapacity s dielektrikem nevodivé kapaliny a kapacitou s dielektrikem vzduchu (plynu). Vzorec lze vyjádřit takto[5]

$$C = C_A + C_B = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_A \cdot \frac{a \cdot l}{d} + \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_B \cdot \frac{a \cdot (l_{max} - l)}{d} = \frac{\varepsilon_0 \cdot a}{d} ((\varepsilon_A - \varepsilon_B) \cdot l + \varepsilon_B \cdot l_{max}) \quad (2-1)$$

Kde ε_A a ε_B jsou permitivity posuvného dielektrika (kapalina) a permitivity vzduchu.

Další metodou je úprava tohoto principu pro vodivé kapaliny, kde jedna elektroda je obklopena izolantem (dielektrikem) a druhá elektroda elektricky spojuje kapalinu. Jde o válcový kondenzátor s proměnnou délkou elektrod. Při zvyšování hladiny roste kapacita na sondě a tím se dá vyhodnotit změnu hladiny. Vzorec popisující změnu kapacity viz obrázek 2—3, lze vyjádřit takto:

$$C = C_0 + C_1 + C_2 \quad (2-2)$$

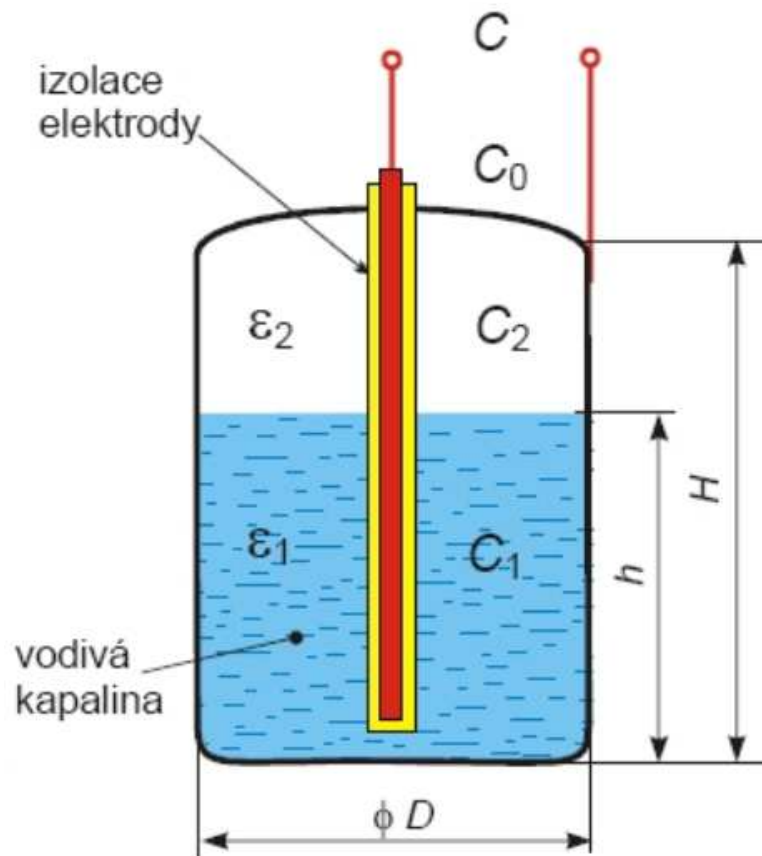
$$C = C_0 + \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \cdot h + \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_2}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \cdot (H - h) \quad (2-3)$$

popis jednotlivých kapacit:

C_0 Kapacita připojení sondy

C_1 Kapacita ponořené části (proměnná dle zanoření)

C_2 Kapacita vynořené části (u plně izolované sondy má zanedbatelný vliv)

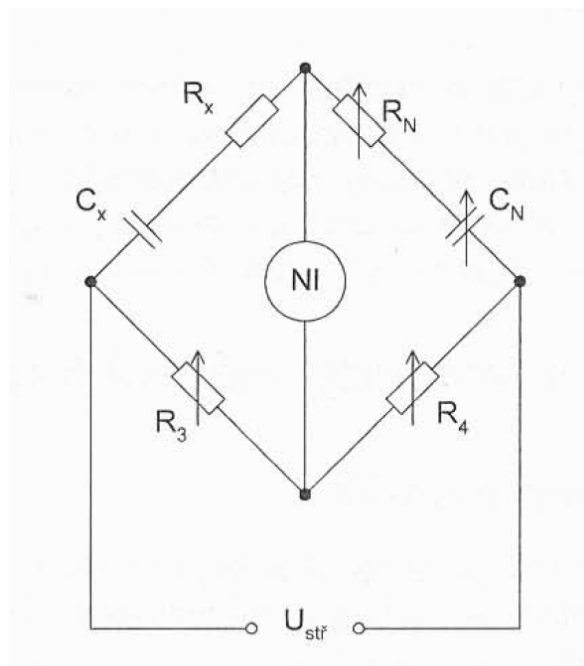


2-5 kapacitní sonda pro vodivé kapaliny [5]

Výhoda tohoto způsobu spočívá ve snadné instalaci sondy. V porovnání s metodou pomocí jazýčkových relé je sonda ohebná (konstrukce ocelového lanka), zatím co tělo s jazýčkovými relé, po kterém se pohybuje toroidní plovák s magnetem je pevná část tvořená trubicí.

Nevýhoda této metody spočívá v případech, kdy se mění měrná vodivost kapaliny a tím dochází ke změně vodivosti vnější elektrody. Dalším nepříjemným vlivem je elektromagnetické rušení. Vzhledem k principu odměřování sonda velmi citlivá na vodivé změny okolí jako je vlhkost a přímý dotyk cizího vodivého předmětu.

2.3.1 Měřicí metoda kapacity Wienův můstek [7]



2-6 Wienův můstek [7]

Wienův můstek je obecnější zapojení de Saulyho. Měřený kondenzátor je nahrazen rezistorem a ideální kapacitou C_X . Rezistor, který je ke zmíněné kapacitě zapojen sériově, je nahrazením ztráty kondenzátoru. Díky odporové dekádě v druhé větvi s kapacitní dekádou, je možné můstek vyvážit a splnit podmínky rovnováhy střídavého můstku.

$$\overline{Z_X} \cdot \overline{Z_4} = \overline{Z_2} \cdot \overline{Z_3} \quad (2-4)$$

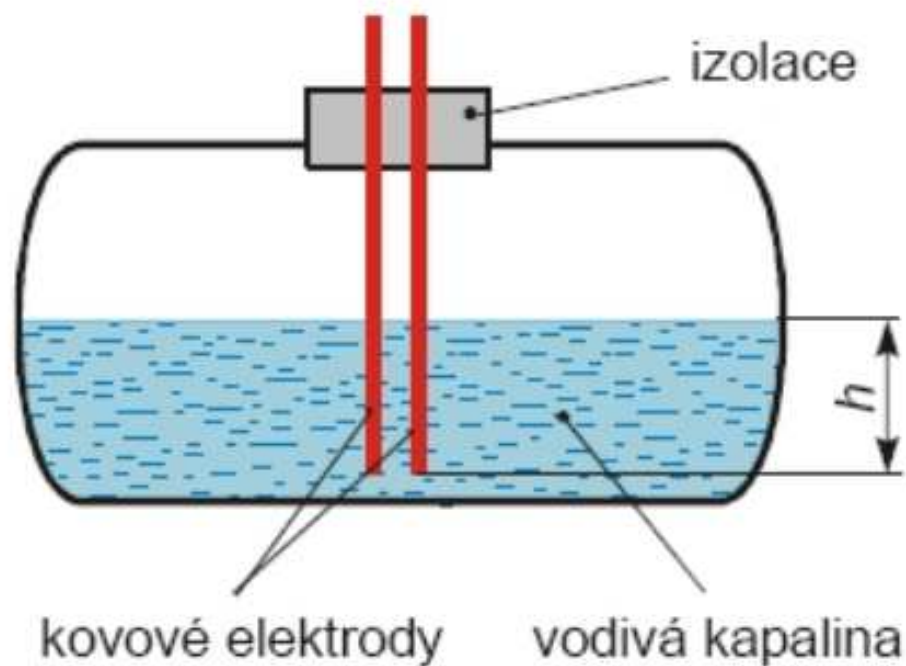
Po dosazení

$$\frac{R_4}{j\omega C_X} = \frac{R_3}{j\omega C_N} \Rightarrow C_X = C_N \frac{R_4}{R_3} \quad (2-5)$$

2.3.2 Měřicí integrační metoda kapacity

Měřicí integrační metoda využívá integračního článku, kde se měřená kapacita zapojuje jako impedance k operačnímu zesilovači. Dle velikosti kapacity se mění strmota nárůstu napětí na výstupu prvního operačního zesilovače. Po dosažení definovaného napětí zareaguje překlápěním klopný obvod s hystezí a neguje napětí na vstupu do prvního operačního zesilovače. Podle velikosti kapacity se mění frekvence obdélníkového průběhu na klopném obvodu. tento způsob byl vybrán pro realizaci měřicího zařízení, a proto je jeho funkce detailně popsána v kapitole 3.2.

2.4 Vodivostní hladinoměry [5]



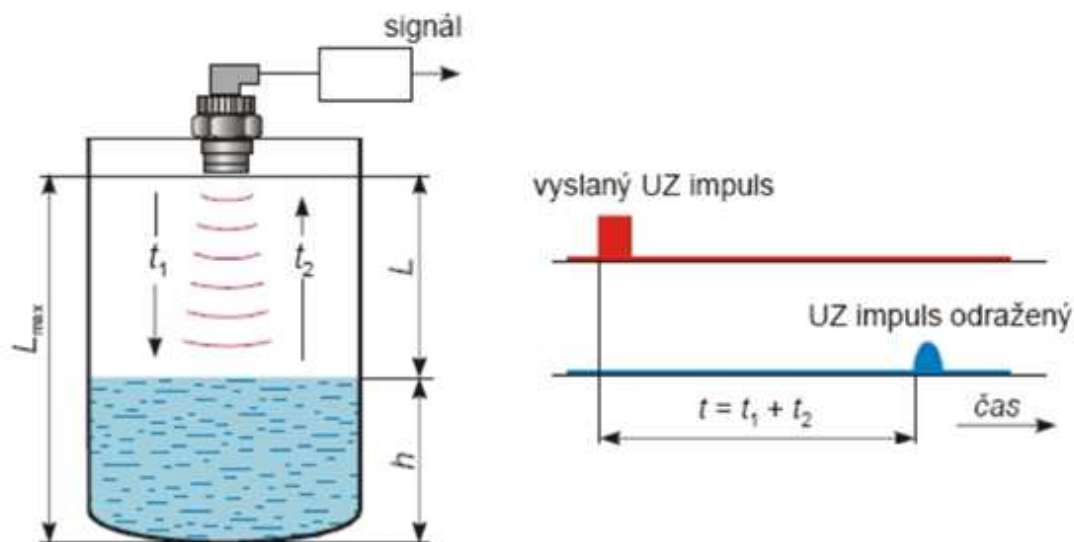
2-7 Spojité měření hladiny vodivostním snímačem [5]

Vodivostní hladinoměry jsou tvořeny sondou s elektrodami vně nádrže s měřenou hladinou kapaliny. Jedná se o měření změny odporu (vodivosti) sondy. Dle výšky hladiny se bude měnit hodnota odporu a pomocí vyhodnocovací jednotky lze tento jev převést na měřitelné veličiny. Lze použít pouze pro aplikace elektricky vodivých kapalin.

Výhoda: poměrně jednoduchý princip.

Nevýhody: Silně závislé na vnějších vlivech, jako je vodivost kapaliny a její teplotě.

2.5 Ultrazvukové hladinoměry [5]



2-8 princip ultrazvukového hladinoměru metodou "Time of flight"[5]

Ultrazvukové hladinoměry pro spojité měření polohy hladiny využívá např. princip doby šíření ultrazvukového impulsu. Jde tedy o dobu ultrazvukového impulsu směrem k měřené hladině a dobu od odrazu zpět ke snímači.

$$h = L_{max} - c \cdot \frac{t}{2} \quad (2-4)$$

$$L = c \cdot \frac{t}{2} \quad (2-5)$$

Rychlost šíření vlny odpovídá rychlosti zvuku v daném prostředí. Využívá se frekvence ultrazvuku od 20 kHz do 60 kHz.

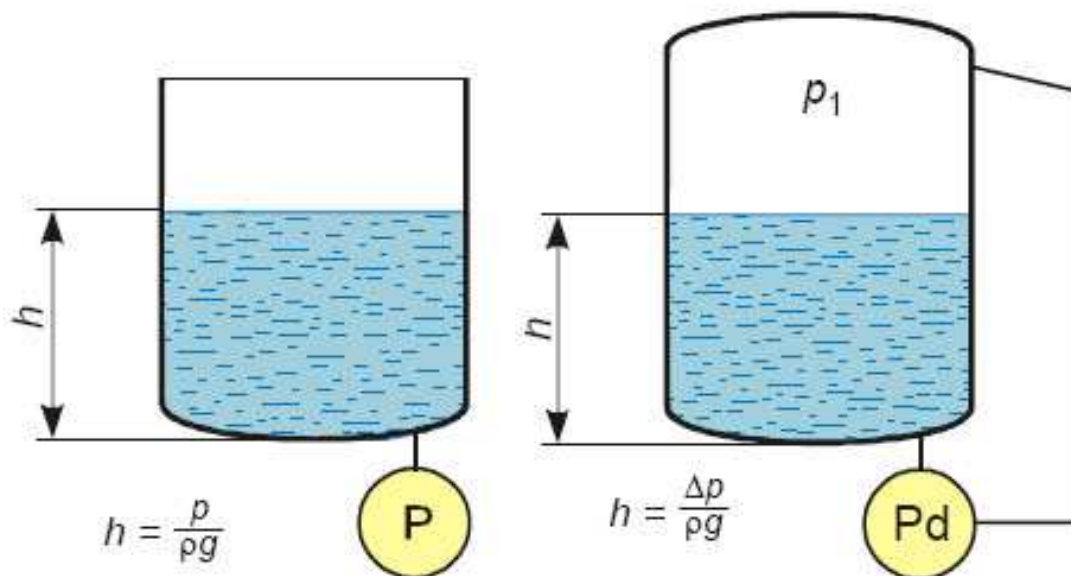
Zařízení se skládá z generátoru a vysílače ultrazvukového signálu. Dále z přijímače ultrazvuku, zesilovače signálu a elektronického vyhodnocování zařízení.

Měření vzdálenosti od sondy má svou neměřitelnou zónu. jde o dobu, kdy ještě piezoelektrický krystal doznívá. U většiny komerčně vyráběných produktů je to vzdálenost cca 0,3 m.

Výhody: Jde o metodu, ve které není styk s měřenou kapalinou. přesnost v řádu desetin procent z měřicího rozsahu.

Nevýhody: Údaj je ovlivněn hustotou a teplotou a proto je u komerčních produktů nutná korekce. Dále je měření ovlivněno prostředím, tvarem a kvalitou povrchu fázového rozhraní, např. pěna.

2.6 Hydrostatické hladinoměry



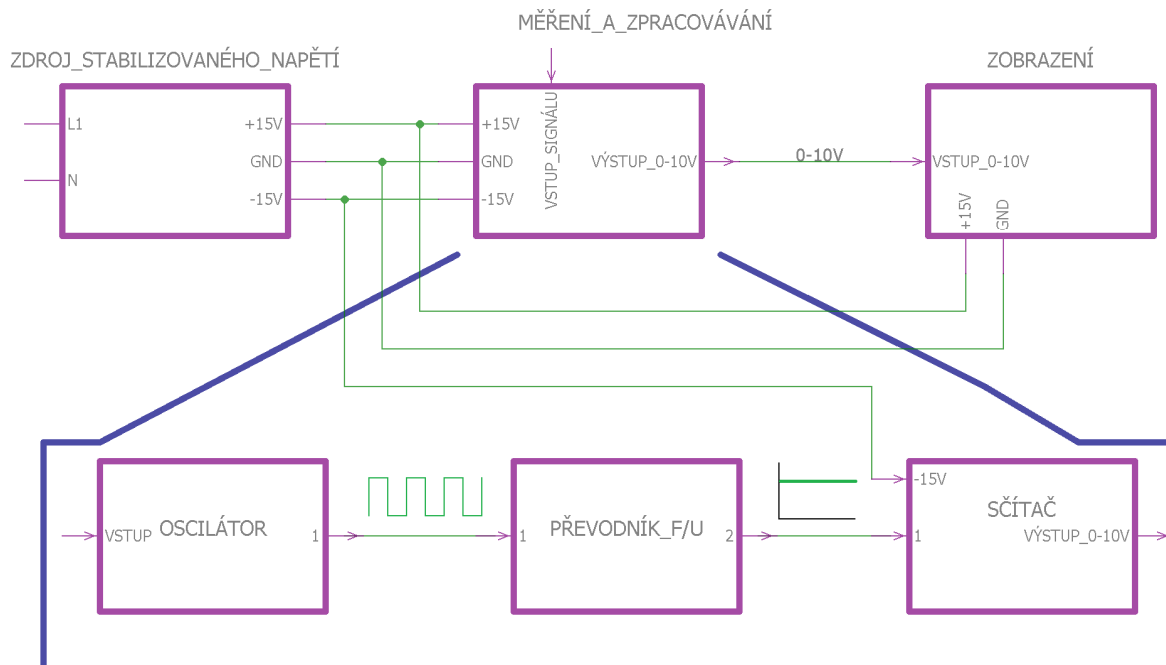
2-9 Hydrostatické hladinoměry pro uzavřené a otevřené nádrže [5]

Měření hladiny kapaliny pomocí hydrostatického tlaku lze provádět dvěma způsoby. Přímé měření tlaku (vodního sloupce), nebo pomocí probublávání. Měření s probubláváním se doporučuje pro agresivní kapaliny, protože tlakový senzor není ve styku s měřeným médiem. Přímá metoda spočívá v měření tlaku vyvolaného vodním sloupcem a pomocí druhého vstupu je tento tlak diferencován s atmosférickým tlakem.

Výhody: Nevadí pěna, metoda není závislá na změnách elektrických vlastností média

Nevýhody: Závislost na hustotě, nevhodné při měření hladiny menší než 5 cm.

3 Realizace měření hladiny kapaliny

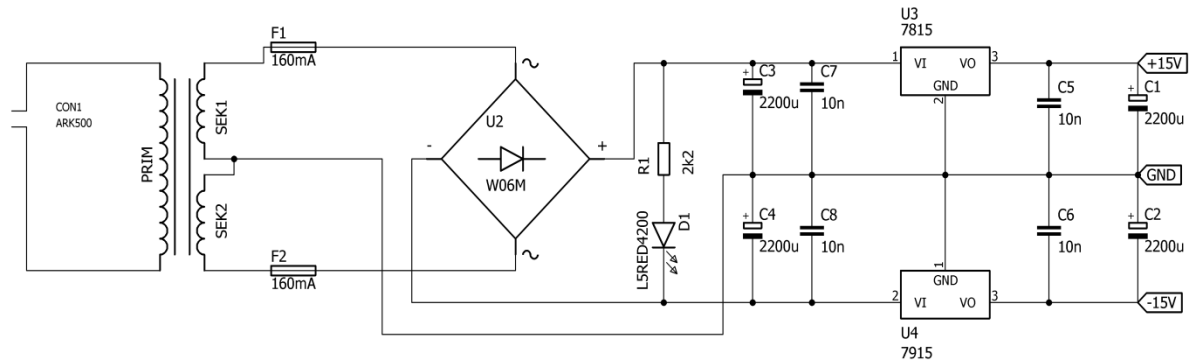


3-1 Blokové schéma

Pro realizaci byla vybrána kapacitní metoda pomocí oscilátoru a převodem hodnoty kapacity na frekvenci. Tato metoda byla vyhodnocena jako nejvhodnější pro účel aplikace měření hladiny vody ve studni, kde se předpokládá stálost vodivosti vody (vliv minerálů), konstantní teplota a odstínění od rušivých vlivů sondy (parazitní proměnné kapacity a dynamické změny polohy sondy).

Vlastní výrobek měřidla hladiny kapaliny je koncipován jako samostatná jednotka s připojením na síťové napětí 230 V, se zdrojovou částí symetrického napětí $\pm 15\text{V}$, oscilačním obvodem pro měření kapacity sondy, analogovým výstupem 0-10V pro další vyhodnocování a grafickou vizualizací v podobě sloupcového zobrazovače (bargraf).

3.1 Zdrojová část [2]

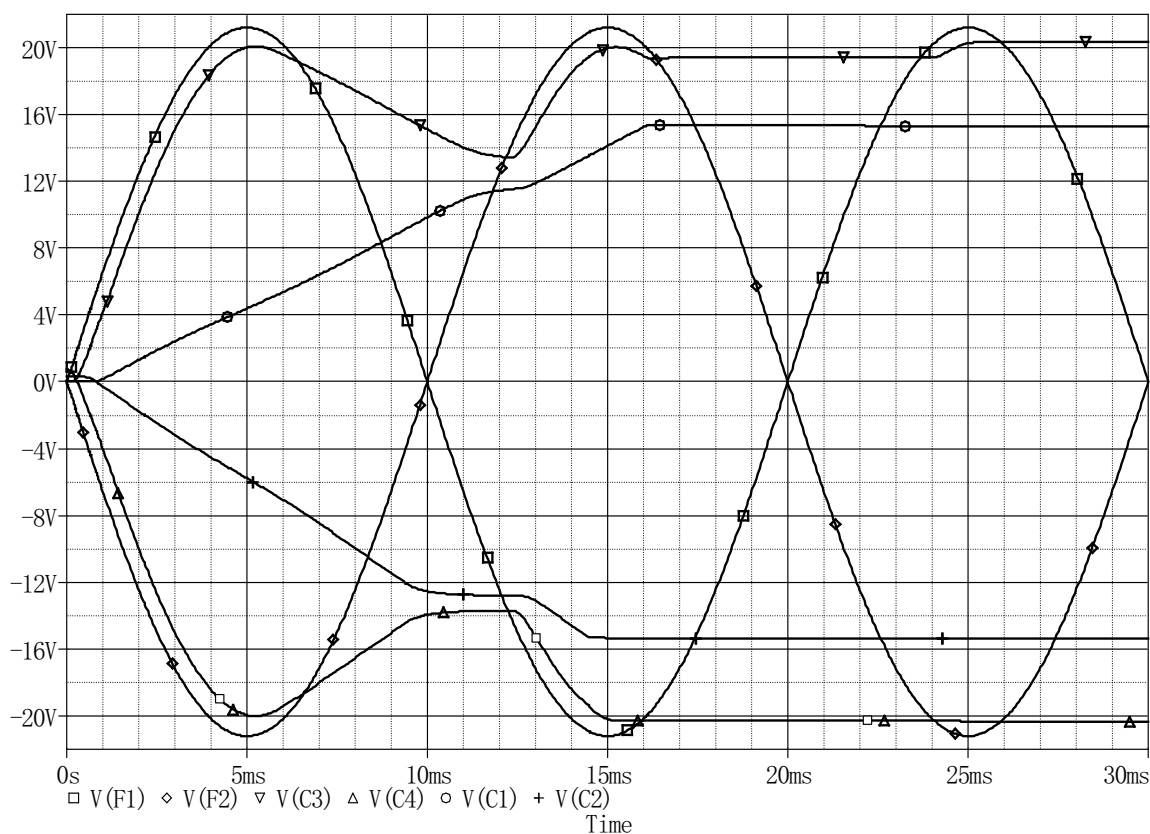


3-2 Schéma zdrojové části [2]

Zdrojová část je tvořena transformátorem, který vyváří pomocí dvou sekundárních vinutí dvě snížená napětí 15 V, následně diodovým můstkem dochází k usměrnění na napětí se špičkou 21,15 V (dle vzorce 3-1). To jde vidět na grafu 3—3 u měřených bodů U_{F1} a U_{F2} proti GND, které jsou navzájem inverzní. Zapojení je koncipováno jako dva dvoupulzní usměrňovače s transformátorem s vyvedeným středem sekundárního vinutí.

$$U_{max} = \sqrt{2} \cdot U_{ef} = 15 \cdot 1,41 = 21,15 V \quad (3-1)$$

Díky usměrnění na diodovém můstku se usměrní napětí na kladné a záporné větvi s maximálním napětím U_{max} (vzorec 3-1) a následně se s kondenzátory C_3 a C_4 usměrněné napětí vyhladí. C_7 a C_8 vyhlazují zpětné špičky z 15V stabilizátorů pro kladné a záporné napětí. V grafu 3-3 vidíme na C_1 a C_2 stabilizované napětí na cca 15V. Pomocí LED diody D_1 (R_1 omezuje proud protékající diodou) signalizujeme zapnutí měřidla.



3-3 Průběh napětí na jednotlivých prvcích zdrojové části

3.2 Měření a zpracovávání signálu ze sondy

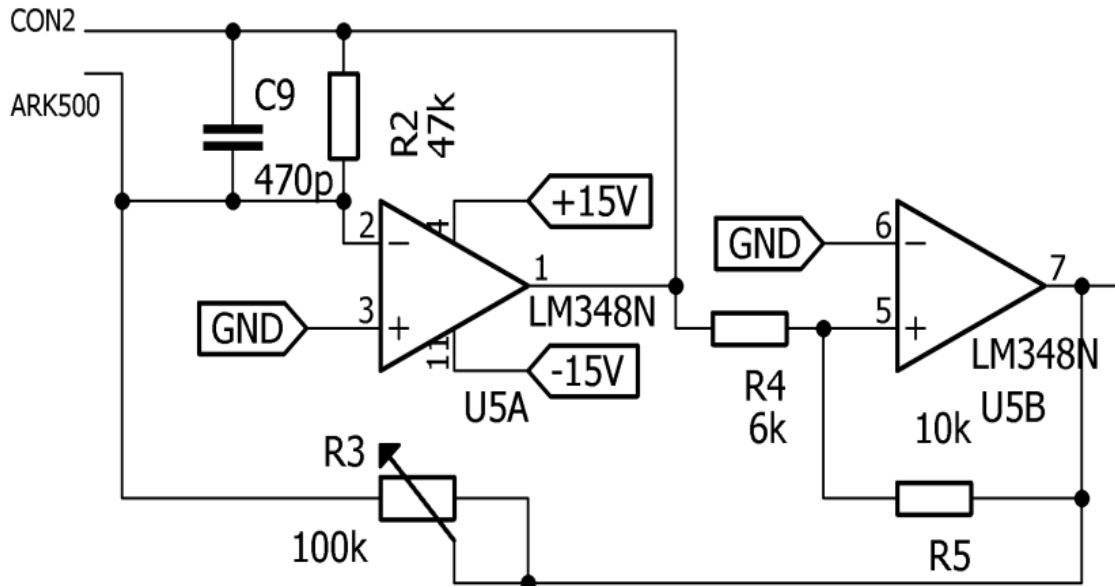
Podstatnou částí celého zařízení je měření a zpracovávání signálu ze sondy. Tato část zapojení se skládá ze tří podskupin.

První je oscilátor tvořený pomocí dvou operačních zesilovačů (integrační článek a komparátor).

Druhá část je převodník frekvence na napětí.

Třetí část je sčítačka pomocí operačního zesilovače umožňující inverzi signálu z předešlého zpracování a kalibraci rozsahu měření (případně přizpůsobení kapacity sondy). Celé toto zapojení je na výstupu charakterizováno pomocí analogového napětí 0-10 V (vlivem napájení operačního zesilovače možno maximálně až 13 V).

3.2.1 Oscilátor



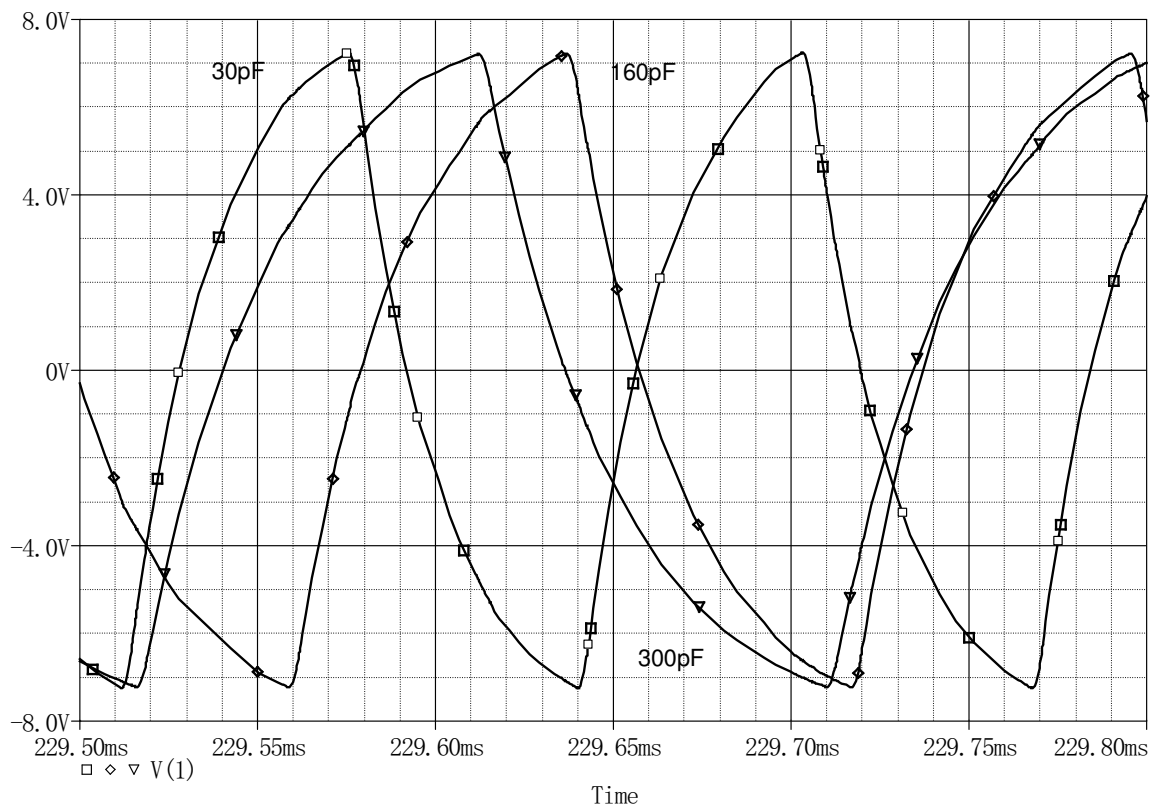
3-4 Oscilátor

Oscilátor je tvořen součinností dvou operačních zesilovačů. A to integračního obvodu (1. OZ) a komparátoru (2. OZ). Na konektor CON2 se připojí sonda, která je paralelně spojena s kondenzátorem C_9 a tím je zaručená nenulová hodnota parametru časové konstanty τ v případě odpojení sondy, nebo poruchy. Kapacita sondy pro demonstrátor se pohybuje v rozmezí 30pF-300pF.

$$\tau = RC = R_2 \cdot (C_{sonda} + C_9) \cong 2,35 \cdot 10^{-5} \quad (3-2)$$

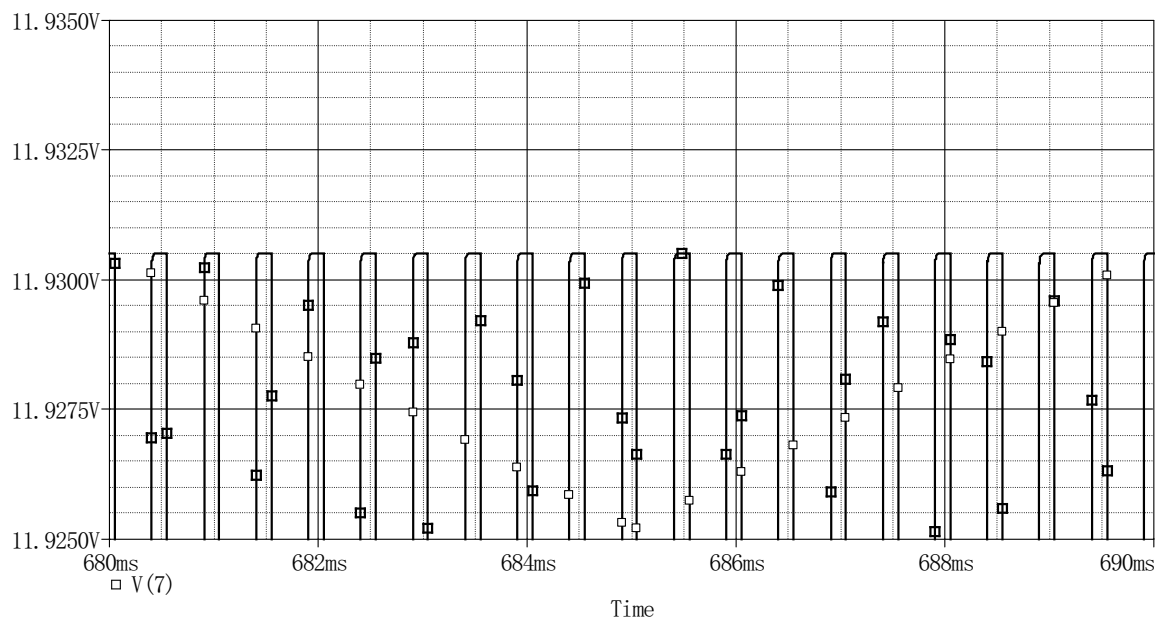
$$U_1 = -U_7 \cdot \frac{R_2}{R_3} \cdot (1 - e^{\frac{-t}{R_2 \cdot (C_{sonda} + C_9)}}) \quad (3-3)$$

Podle vzorce 3-3 dojdeme k tvaru nabíjecího napětí na výstupu 1. operačního zesilovače. Podle toho jak se mění kapacita sondy se bude měnit i časová konstanta integračního obvodu (vzorec 3-2). Pro možnost úprav citlivosti sondy je R_3 ve verzi trimr a umožňuje přeladění oscilátoru. Změna časové konstanty je vidět na grafu 3—5, kde jsou vyobrazeny 3 hodnoty sondy (30pF, 160pF a 300pF). Zlom v napětí v cca +/-7,2 V je popsán pod grafem.



3-5 Změna kapacity sondy

Druhý operační zesilovač je zapojen jako Schmittův klopný obvod. Vstupní napětí je bráno z výstupu 1. operačního zesilovače a jako referenční napětí slouží GND (v našem případě jde o 0 V). Šířka hysterezního pásma definována saturačním napětím a poměrem rezistorů R_4 a R_5 . Vztah pro hysterezní pásmo vidíme na vztahu 3-4.

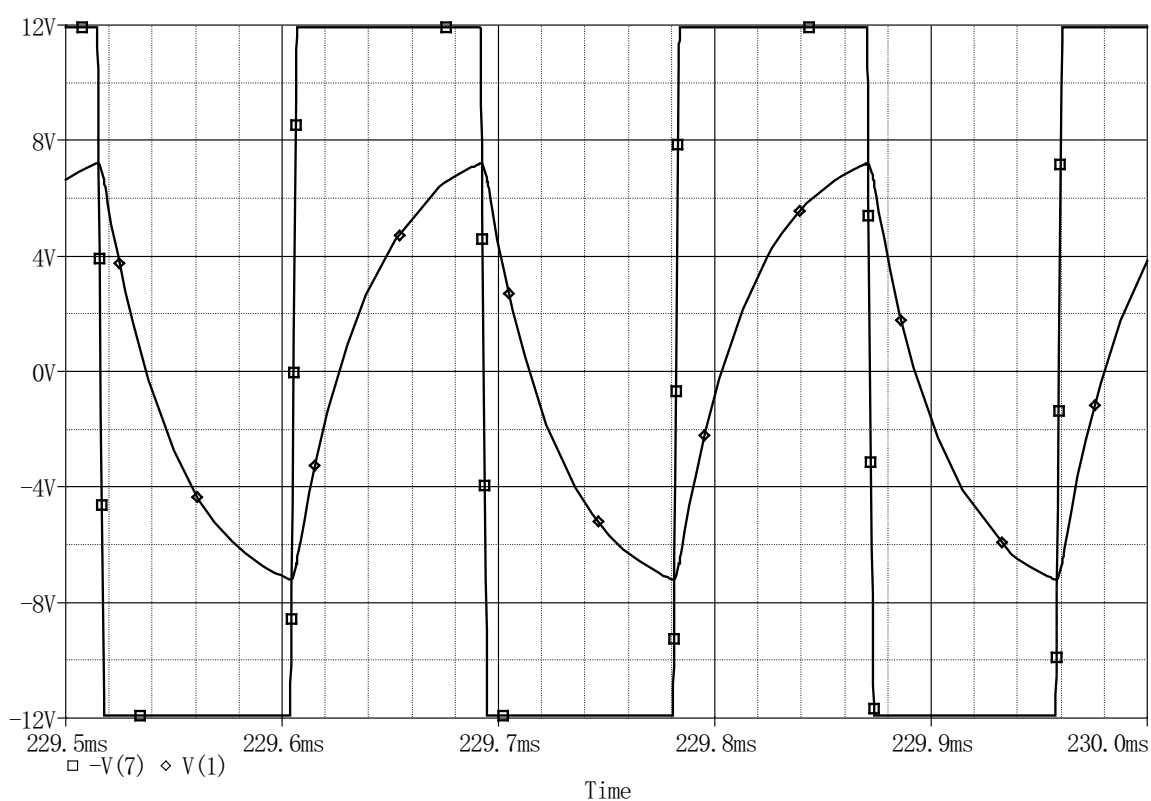


3-6 Ověření saturačního napětí

Pro výpočet hysterezního pásma jsme si museli zjistit saturační napětí konkrétního operačního zesilovače LM348N. Na grafu 3—6 je vidět, že hodnota odpovídá 11,9305 V.

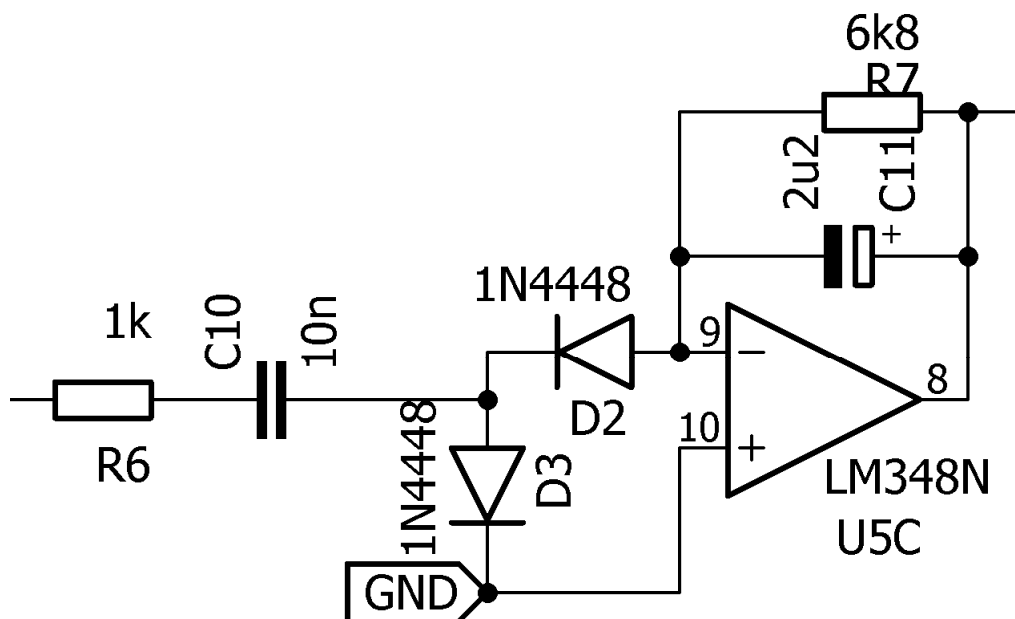
$$U_H = (U_{SAT}^+ - U_{SAT}^-) \cdot \frac{R_4}{R_5} = 23,861 \cdot \frac{6000}{10000} = 14,316 \text{ V} \quad (3-4)$$

Protože referenční napětí je 0 V je hystereze symetricky rozdělena mezi +7,158 V a -7,158 V. Ve chvíli kdy se na vstupu (5) objeví jedna z těchto hodnot napětí dojde k překlopení klopného obvodu a tím i k opačnému napětí na vstupu (2) do prvního operačního zesilovače. Jde o zápornou zpětnou vazbu, a proto je signál na výstupu druhého operačního zesilovače V(7) obrácen. Zobrazení -V(7) v grafu 3—7.



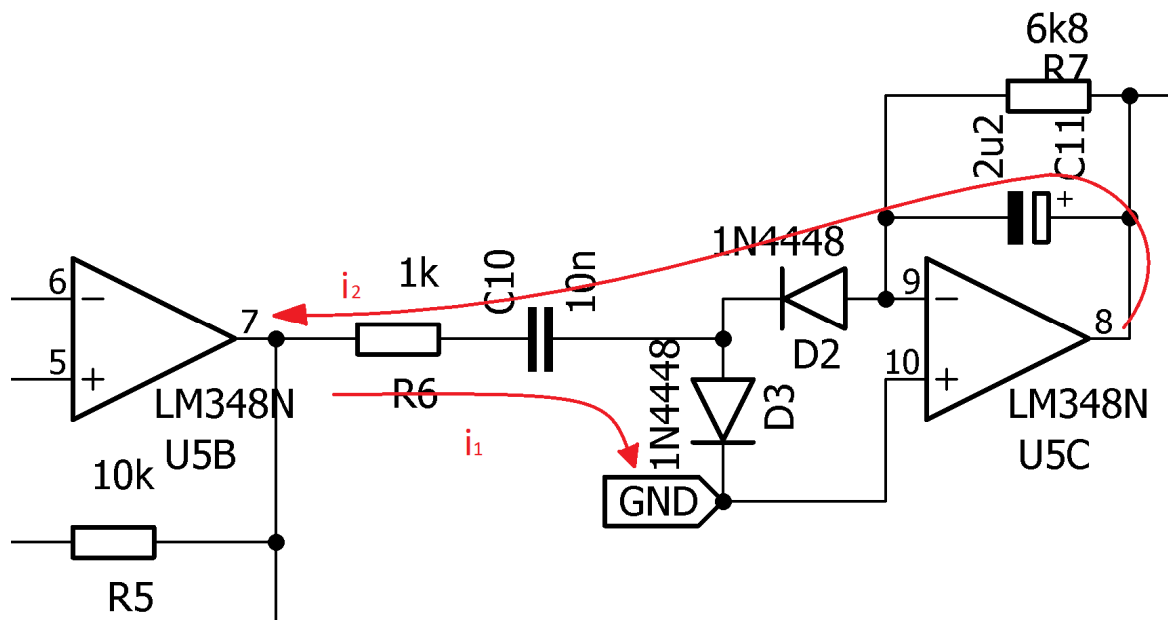
3-7 Graf průběhu oscilátoru na výstupu 1 a na výstupu 7

3.2.2 Převodník frekvence na napětí [4]



3-8 Převodník frekvence na napětí

Jde o nábojovou pumpu. Pokud se na vstupu objeví kladné napětí $+U_{SAT}$ začne proud i procházet přes R_6, C_{10} a D_3 do země. Kondenzátor C_{10} se nabíjí až na saturační hodnotu operačního zesilovače U5B z předcházejícího zpracování. Až dosáhne saturačního napětí proud i zanikne.



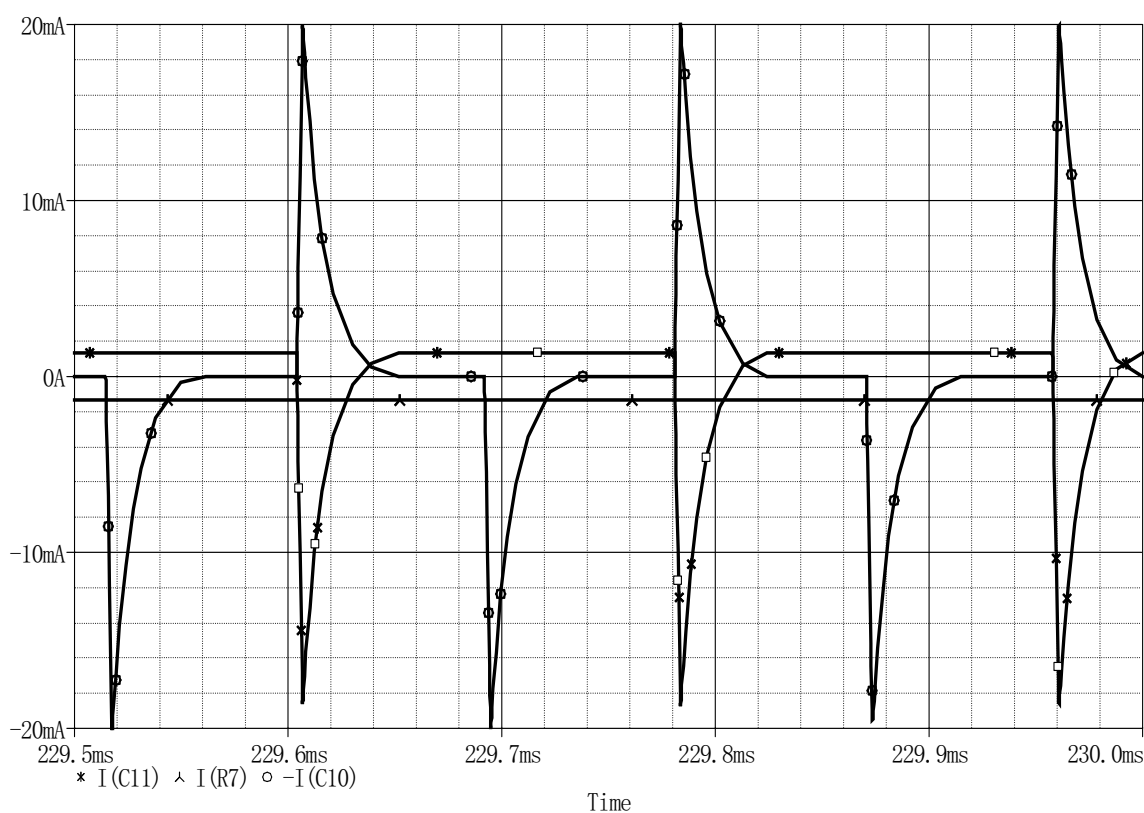
3-9 Směr proudů při nabíjení kondenzátorů

Ve chvíli, kdy se na vstupu do obvodu objeví opačné napětí $-U_{SAT}$ začne procházet proud opačné polarity přes obvody (po směru proudu) R_7 a zároveň C_{11} , D_2 , C_{10} , R_6 , dále do operačního zesilovače U5B. Kondenzátor C_{10} se každou půlperiodou přebíjí na opačné napětí dokud nedosáhne kladného, nebo záporného saturačního napětí. Náboj za každou periodu se dá vyjádřit vztahem:

$$Q_1 = 2 \cdot C_{10} \cdot U_{SAT} \quad (3-4)$$

Dále se tento náboj přečerpá do kondenzátoru C_{11} v půlperiodě, kdy přes něj prochází proud a zároveň je celou dobu postupně vybíjen přes rezistor R_7 . Je-li časová konstanta dobře dimenzována vzhledem k frekvenci, tak lze uvažovat vybíjecí proud za konstantní, dle vztahu

$$i_{R_7} = \frac{U_8}{R_7} \quad (3-5)$$



3-10 Proudů v jednotlivých větvích

V jedné periodě se na rezistoru R_7 změní náboj na teplo dle vztahu

$$Q_2 = \frac{U_8}{R_7} \cdot T \quad (3-6)$$

V rovnovážném stavu, tedy když se frekvence na vstupu do obvodu nemění a výstupní napětí U_8 se již nemění platí rovnost nábojů. Toto lze sledovat v grafu 3—10 kde se náboje v jedné půlplně rovnají (plocha pod křivkou). Pokud by zobrazení proudů na kondenzátorech stejnou polaritu, budou se v jedné půlplně dokonale překrývat.

Z tohoto lze odvodit vztah mezi frekvencí na vstupu obvodu a velikostí výstupního napětí.

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow 2 \cdot C_{10} \cdot U_{SAT} = \frac{U_8}{R_7} \cdot T \quad (3-7)$$

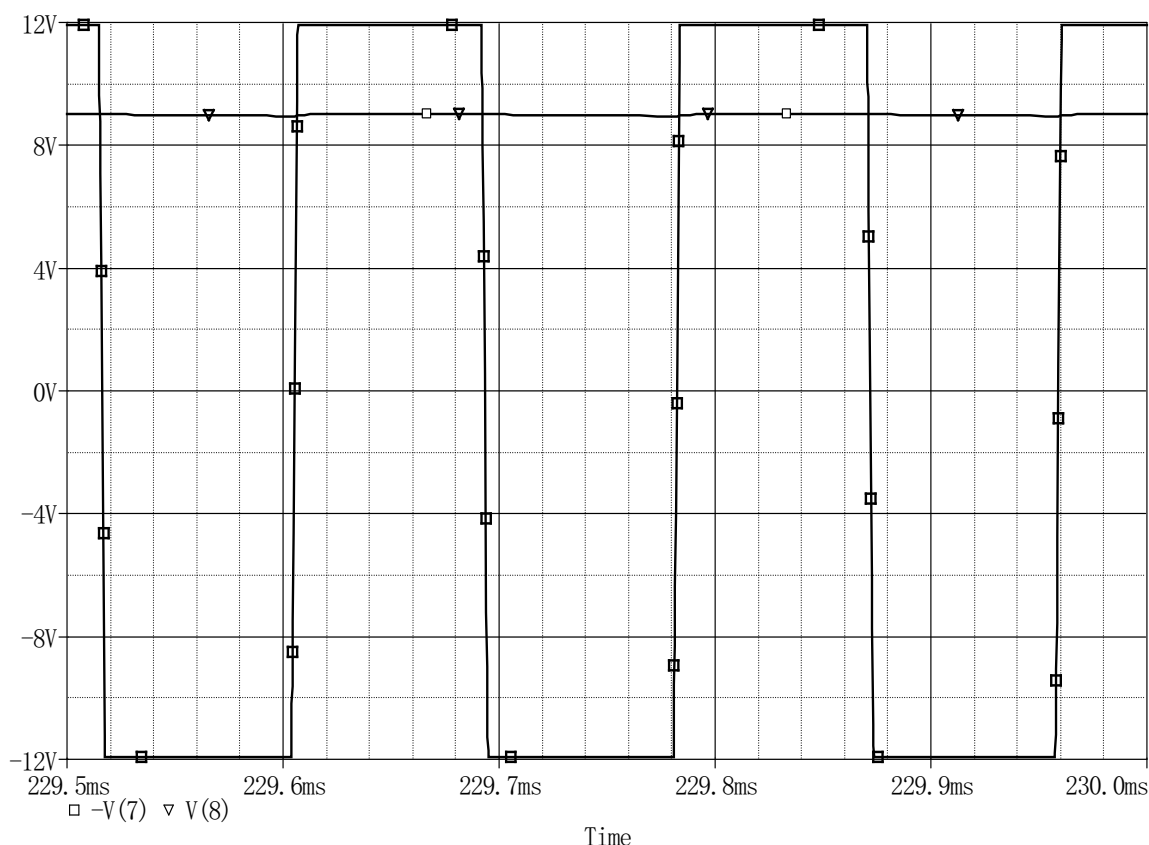
$$U_8 = \frac{2 \cdot U_{SAT} \cdot C_{10} \cdot R_7}{T} = 2 \cdot U_{SAT} \cdot C_{10} \cdot R_7 \cdot f \quad (3-8)$$

Z grafu 3—6 z minulé kapitoly je známo, že saturační napětí je 11,93 V a perioda obdélníkového průběhu je 0,12 milisekundy. Frekvence tedy je 8333 Hz. Simulace je provedena při nastavení trimru R_3 na hodnotu 68 k Ω .

$$U_8 = 2 \cdot U_{SAT} \cdot C_{10} \cdot R_7 \cdot f = 2 \cdot 11,9305 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 6800 \cdot 8333 = 13,52 \approx 12 \text{ V} \quad (3-9)$$

V tomto případě je výstupní napětí limitováno saturačním. Vzhledem k mezní hodnotě kapacity je toto napětí zobrazení velmi nízké hladiny, k dostavení zobrazení hladiny na nulu slouží trimmer R_3 , který mění frekvenci v poměru s kapacitou sondy. Když se výpočet zopakuje s hodnotou 700pF (sonda má 230pF), tak hodnota již bude v měřitelném pásmu.

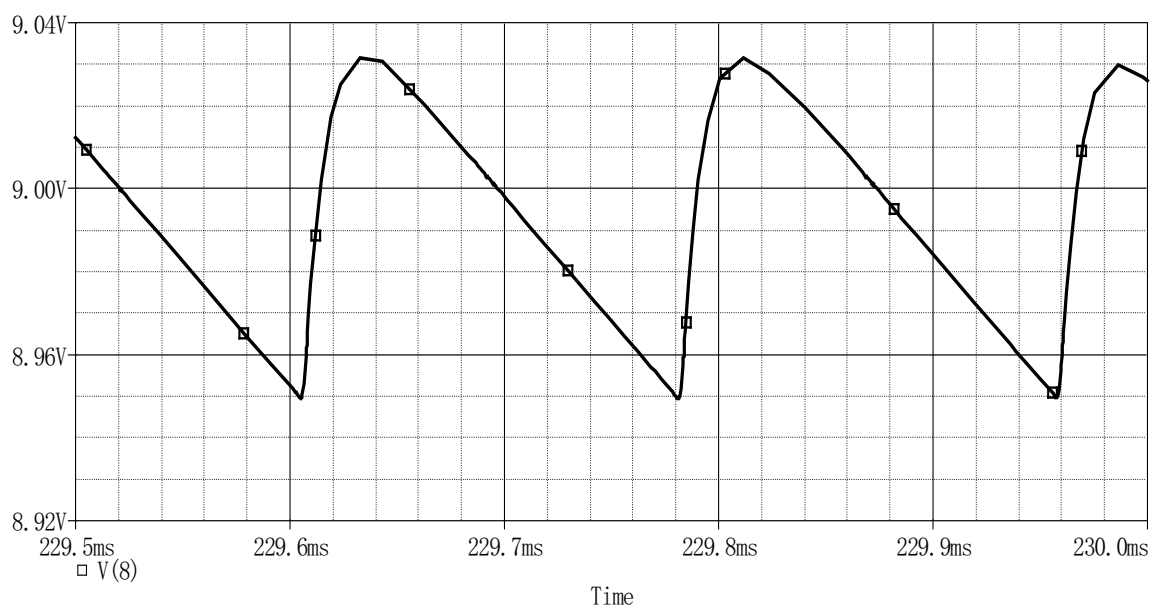
$$U_8 = 2 \cdot U_{SAT} \cdot C_{10} \cdot R_7 \cdot f = 2 \cdot 12 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 6800 \cdot 5649 = 9,17 \text{ V} \quad (3-10)$$



3-11 Zobrazení vstupu a výstupu z převodníku frekvence na napětí

Při výpočtu byla zjištěna odchylka 1,8%, protože odečtená hodnota při měření byla 9,0 V. Tato odchylka může být způsobena neideálním obdélníkovým průběhem. Pro ověření bylo ještě

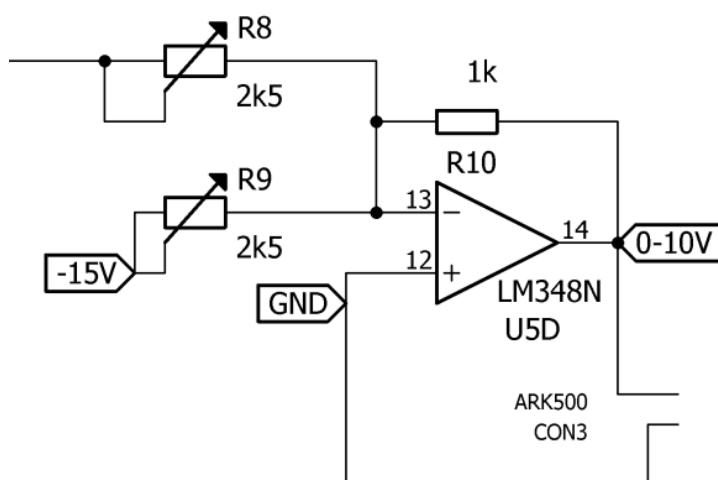
provedeno několik měření se zjednodušeným modelem, místo oscilátoru byl použit komparátor a zdroj obdélníkového průběhu napětí a chybovost byla cca 2 procenta.



3-12 Zvlnění napětí na výstupu z převodníku

Na grafu 3—12 je vidět zvlnění napětí na kondenzátoru převodníku. Při kapacitě sondy 270pF je na výstupu z převodníku cca 9 V viz výše. Při této hodnotě je zvlnění 1 procento. Při kapacitě sondy 3030pF je napětí na výstupu cca 1,85 V se zvlněním 5 procent. Tuto hodnotu považujeme za hraniční při této konstrukci měřidla. Pro použití větších kapacit sondy (měření větších rozsahů hladiny) se pro případné zpřesnění může zvýšit kapacita kondenzátoru C_{11} .

3.2.3 Sčítací obvod



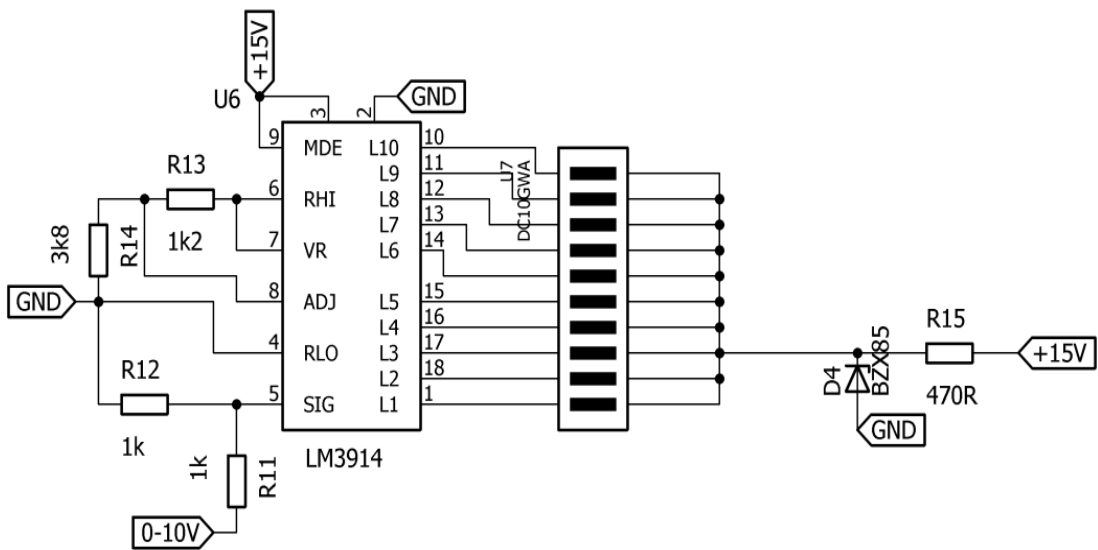
3-13 Sčítací obvod

Sčítací obvod má 2 funkce. Vytváří místo, kde se může kalibrovat sonda a měnit měřicí rozsah. Zároveň invertuje výstup z převodníku frekvence na napětí, protože za převodníkem napětí v závislosti na rostoucí kapacitě sondy (rostoucí hladina) klesá.

$$U_{14} = -i_R \cdot R = -\left(U_8 \cdot \frac{R_{10}}{R_8} - 15 \cdot \frac{R_{10}}{R_9}\right) \quad (3-11)$$

Tedy pomocí trimru R_8 se nastavuje citlivost rozsahu. Je možné jej zvýšit i snížit. Pomocí trimru R_9 se nastavuje začátek rozsahu, popř. nulová hladina. Na konektoru je vyvedeno analogové napětí pro další zpracování.

3.3 Zobrazení hladiny pomocí stupnice[5]



3-14 Zobrazení hladiny

Zobrazení hladiny se realizuje pomocí integrovaného obvodu LM3914 (lineární buzení 10 LED diod). Pro případné nelineární zobrazení hladiny lze tento obvod vyměnit v patici za logaritmický či exponenciální (obvody LM3915, LM3916).

Dále vlastní stupnice vytvořená deseti LED diodami U7. Pro jejich napájení je vytvořeno napětí 5,1 V pomocí Zenerovy diody D_4 a ochranného rezistoru R_{15} .

Obvod LM3914 je napájen 15 V. Tento obvod vyhodnocuje napětí 0-5 V, proto je na vstupu napěťová dělička z rezistoru R_{11} a R_{12} . rezistory R_{13} a R_{14} slouží k regulaci jasu buzených LED diod.

$$Ref\ Out\ V = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_{14}}{R_{13}}\right) = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{3800}{1200}\right) = 5,2V \quad (3-12)$$

$$I_{LED} = \frac{12,5}{R_{13}} = \frac{12,5}{1200} = 0,0104A \quad (3-13)$$

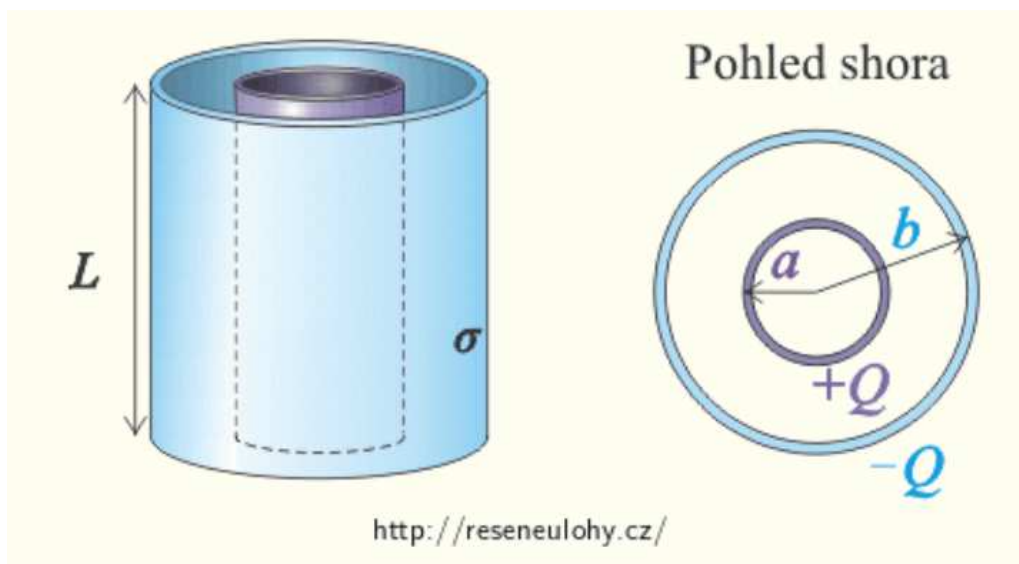
$$R_{15} = \frac{U_{R_{15}}}{I} = \frac{15-5,1}{0,02} = 495 \cong 470\Omega \quad (3-14)$$

3.4 Konstrukce sondy



3-15 konstrukce sondy

Sonda je ze tvořena ze dvou ocelových lanek. jedno lanko je obaleno do teplem smršťovací bužírky (Zesíťovaný polyolefin). Pro konstantní změnu kapacity sondy a hladiny kapaliny je pomocí stahovací pásky a distanční plastové podložky zajištěna vzdálenost mezi izolovaným lankem a neizolovaným. Funkce: izolace na prvním ocelovém lanku tvoří dielektrikum. Obě ocelové lanka a voda tvoří plochy elektrod. Při zvýšení ploch elektrod (zvýšením hladiny kapaliny) se zvyšuje kapacita sondy. Sonda je pak aplikace válcového kondenzátoru, kde se mění délka válce.



3-16 Vyobrazení válcového kondenzátoru [6]

Popis obrázku 3—16: Na vnitřní straně válce je umístěno ocelové lanko o poloměru "a". Toto lanko je obaleno do stahovací bužírky o tloušťce "a – b". Celá tato sestava je ponořena do kapaliny o poloměru "b" a voda je vodivě spojena s druhou elektrodou, také z ocelového lanka.

Dle Gaussova zákonu je známo, že:

$$E \cdot S = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (3-14)$$

$$\text{Z toho vyplývá intenzita elektrického pole } E = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot S} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 L r} \quad (3-15)$$

$$\text{Napětí na kondenzátoru } U = \int_{(+)}^{(-)} E dr = \int_{(+)}^{(-)} \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 L r} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 L} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (3-16)$$

$$\text{Kapacita } C = \frac{Q}{U} = 2\pi\epsilon_0 \frac{L}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (3-17)$$

Ze vztahu 3-16 považujeme údaje o poloměrech kladné a záporné elektrody za konstantní. Se vzrůstající hladinou (ponoření sondy do kapaliny), parametr L , budeme dle vzorce 3-16 zvedat kapacitu tohoto válcového kondenzátoru.

4 Kalibrační měření

4.1 Kalibrace sondy

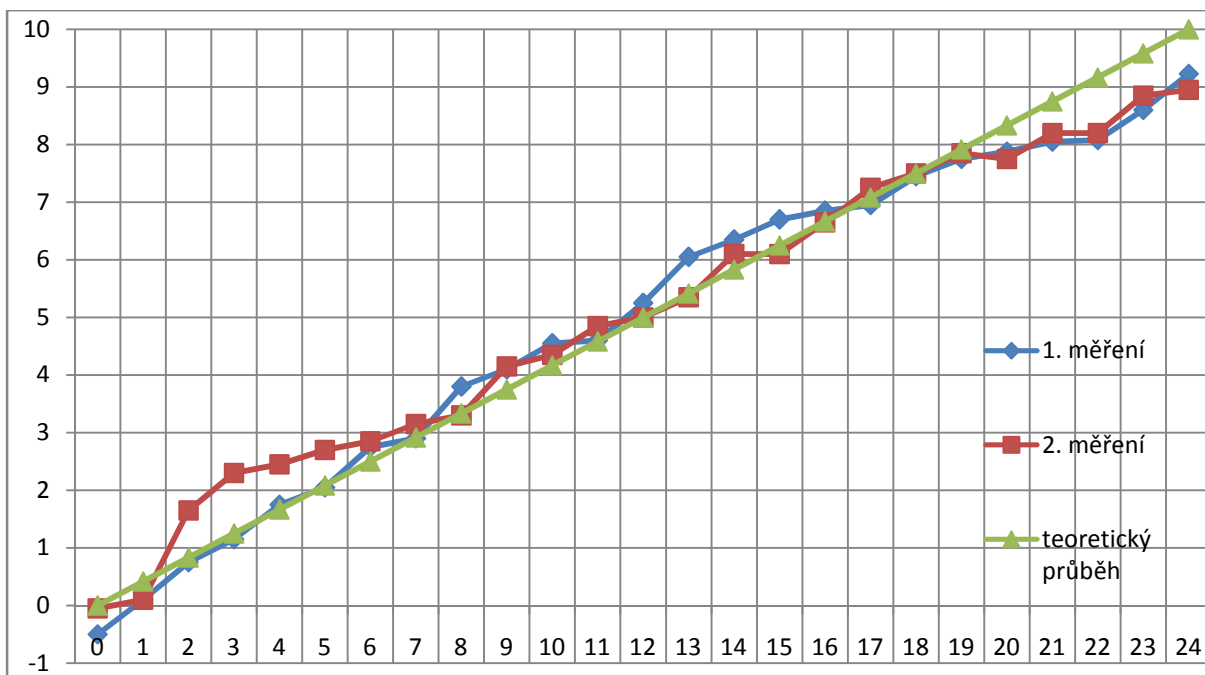
Bylo provedeno kalibrační měření, které se sestává z nastavení rozsahu měřeného vodního sloupce a jeho ocejchování. Nejdříve, než se začne kalibrování, tak se má nastavit R_8 a R_9 do poloviny jejich nastavení. Jako první se provede označení horního rozsahu a maximální hladiny. To znamená nastavit sondu do pozice u hladiny a pomocí trimru R_9 nastavit napětí na výstupu na 0 V. Následně se označí maximální hladina ponořením sondy na maximální ponor a pomocí trimru R_3 se nastaví na výstupu +10 V.

4.2 Proměření sondy

1. měření				2. měření			
výška hladiny [cm]	výstupní napětí [V]			výška hladiny [cm]	výstupní napětí [V]		
	min.	max.	průměr		min.	max.	průměr
0	-0,9	-0,1	-0,5	0	-0,3	0,2	-0,05
1	-0,2	0,4	0,1	1	0	0,2	0,1
2	0,4	1,1	0,75	2	1,3	2	1,65
3	0,8	1,5	1,15	3	1,9	2,7	2,3
4	1,4	2,1	1,75	4	1,8	3,1	2,45
5	1,8	2,3	2,05	5	2,5	2,9	2,7
6	2,4	3,1	2,75	6	2,3	3,4	2,85
7	2,5	3,3	2,9	7	2,8	3,5	3,15
8	3,3	4,3	3,8	8	2,8	3,8	3,3
9	3,7	4,5	4,1	9	3,8	4,5	4,15
10	4	5,1	4,55	10	3,8	4,9	4,35
11	4,3	4,9	4,6	11	4,5	5,2	4,85
12	4,9	5,6	5,25	12	4,7	5,3	5
13	5,6	6,5	6,05	13	5	5,7	5,35
14	5,8	6,9	6,35	14	5,5	6,7	6,1
15	6,3	7,1	6,7	15	5,5	6,7	6,1
16	6,4	7,3	6,85	16	6,2	7,1	6,65
17	6,6	7,3	6,95	17	6,8	7,7	7,25
18	7,2	7,7	7,45	18	7	8	7,5
19	7,3	8,2	7,75	19	7,4	8,3	7,85
20	7,65	8,1	7,875	20	7,1	8,4	7,75
21	7,87	8,23	8,05	21	7,7	8,7	8,2
22	7,95	8,2	8,075	22	7,9	8,5	8,2
23	8,5	8,7	8,6	23	8,5	9,2	8,85
24	9,15	9,3	9,225	24	8,6	9,3	8,95

4-1 Tabulka měření snímače o délce 25 cm

U měření sondy byla použita metoda postupného vynořování z kapaliny po 1 cm a odečet výstupního napětí. Pro zvýšení přesnosti bylo měření toto měření opakováno po asi 6 hodinách provozu měřidla (z důvodu odstranění měřících chyb kvůli oteplování operačního zesilovače).



4-1 Záznam z měření snímače o délce 25 cm

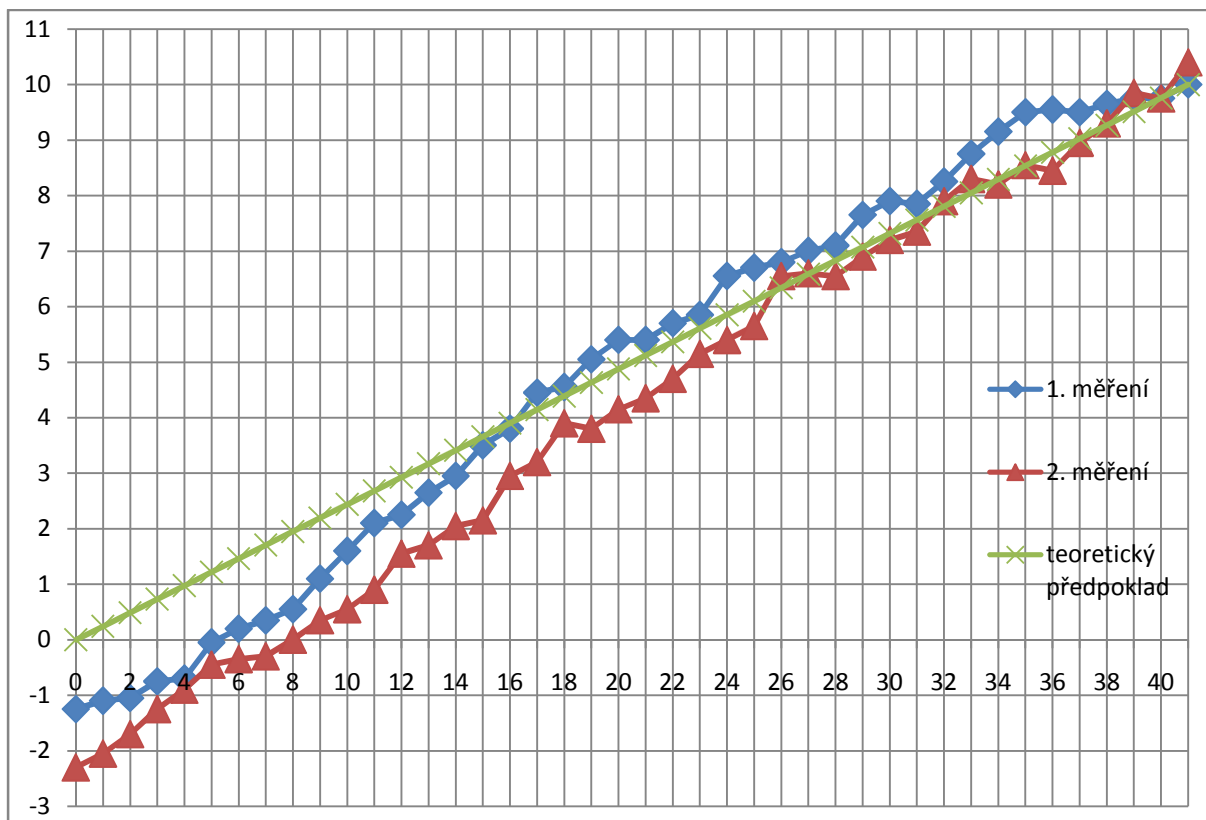
Z měření obrázek 4—1 je vidět částečné odchylení od teoretického průběhu způsobené parazitními jevy a rušením. V tabulce 4—1 je záznam hodnot pro každou výškovou hladinu (maximální a minimální), rozptyl hodnot někdy přesahoval více než 1V. Pro přesnější údaje by bylo třeba zaznamenávat okamžitou hodnotu na výstupu a tento soubor okamžitých hodnot vhodněji zprůměrovat pro každou hladinu zvlášť. Z důvodu velmi citlivých trimérů pro kalibraci rozsahu nebylo možné přesně dostavit napětíový rozsah na 0 - 10 V a proto je celá křivka měření posunuta o cca 0,35 V níže. Doporučuje se vyměnit za více otáčkové.

Po tomto měření byl měřicí rozsah překalibrován na snímání hladin 0 - 42 cm a znovu dvakrát proměřen pro účely srovnání.

Z měření, viz níže, obrázek 4—2 a tabulka 4—2 je patrný větší rozptyl hodnot a změnu strmosti proti teoretickému průběhu. To je částečně způsobené náhlou změnou teploty okolí. Měření bylo prováděno postupným vynořováním, tedy stav největšího ponoření je ještě za podmínek daných kalibračním rozsahem. Při vynořování se chyba daná rozkalibrováním zvyšuje a dochází k odklonu od teoretického průběhu.

1. měření				2. měření			
výška hladiny [cm]	výstupní napětí [V]			výška hladiny [cm]	výstupní napětí [V]		
	min.	max.	průměr		min.	max.	průměr
0	-1,7	-0,8	-1,25	0	-2,8	-1,8	-2,3
1	-1,7	-0,5	-1,1	1	-2,6	-1,5	-2,05
2	-1,5	-0,6	-1,05	2	-2,2	-1,2	-1,7
3	-1,2	-0,3	-0,75	3	-1,6	-0,9	-1,25
4	-1,2	-0,2	-0,7	4	-1,2	-0,6	-0,9
5	-0,3	0,2	-0,05	5	-0,9	0	-0,45
6	-0,1	0,5	0,2	6	-0,8	0,1	-0,35
7	0,1	0,6	0,35	7	-0,7	0,1	-0,3
8	0,3	0,8	0,55	8	-0,3	0,3	0
9	0,7	1,5	1,1	9	-0,2	0,9	0,35
10	1,2	2	1,6	10	0,2	0,9	0,55
11	1,6	2,6	2,1	11	0,5	1,3	0,9
12	1,9	2,6	2,25	12	1	2,1	1,55
13	2,3	3	2,65	13	1,3	2,1	1,7
14	2,6	3,3	2,95	14	1,6	2,5	2,05
15	3,1	3,9	3,5	15	1,9	2,4	2,15
16	3,4	4,2	3,8	16	2,4	3,5	2,95
17	4,1	4,8	4,45	17	2,7	3,7	3,2
18	4,3	4,8	4,55	18	3,3	4,5	3,9
19	4,5	5,6	5,05	19	3,4	4,2	3,8
20	5,1	5,7	5,4	20	3,6	4,7	4,15
21	5	5,8	5,4	21	3,8	4,9	4,35
22	5,4	6	5,7	22	4,3	5,1	4,7
23	5,5	6,2	5,85	23	4,8	5,5	5,15
24	6,2	6,9	6,55	24	5	5,8	5,4
25	6,3	7,1	6,7	25	5,4	5,9	5,65
26	6,5	7,1	6,8	26	6,2	6,9	6,55
27	6,4	7,6	7	27	6,1	7,1	6,6
28	6,5	7,7	7,1	28	6,2	6,9	6,55
29	7,2	8,1	7,65	29	6,4	7,4	6,9
30	7,5	8,3	7,9	30	6,7	7,7	7,2
31	7,4	8,3	7,85	31	6,9	7,8	7,35
32	8	8,5	8,25	32	7,4	8,4	7,9
33	8,5	9	8,75	33	7,7	8,9	8,3
34	8,9	9,4	9,15	34	7,8	8,6	8,2
35	9,2	9,8	9,5	35	7,9	9,2	8,55
36	9,2	9,9	9,55	36	8	8,9	8,45
37	9	10	9,5	37	8,4	9,5	8,95
38	9,2	10,1	9,65	38	8,9	9,7	9,3
39	9,4	10,1	9,75	39	9,3	10,4	9,85
40	9,3	10,2	9,75	40	9,3	10,2	9,75
41	9,8	10,2	10	41	10,2	10,6	10,4

4-2 Tabulka měření snímače o délce 42 cm



4-2 Záznam z měření snímače o délce 42 cm

Během proměřování se musela hlídat kalibrace horního a spodního rozsahu z důvodu teplotního ovlivnění výstupního napětí. Rozdíl chybovosti obou rozsahů (odkloněním od teoretického předpokladu) je také způsobem časovou náročností, která je v druhém případě větší o cca dvojnásobek.

5 Závěr

Na základě soupisu teoretických možností a způsobů měření hladiny byla vybrána kapacitní metoda. Tato metoda byla vybrána z důvodů použitelnosti v předpokládané aplikaci měření hladiny vody ve studni, kde je předpoklad stálosti kvality vody (minerály a s tím i vodivost vody), stínění od okolního rušení a zanedbatelné proudění vody.

Dle metody bylo vyvinuto zařízení pro měření hladiny kapaliny pomocí realizace s operačními zesilovači. Principiálně se zapojení odvíjí od měření kapacit pomocí integračního obvodu a komparátoru s hysterezí. Toto zapojení převádí kapacitu sondy na frekvenci obdélníkového průběhu, která je dále převedena převodníkem z frekvence na napětí. Tato úroveň je umožněna zobrazovat pomocí sloupcového grafu z LED diod.

Bylo provedeno měření, kde bylo zjištěno, že se dle hodnoty výstupního napětí dá opakovaně měřit hladina kapaliny. Tedy teoretický předpoklad byl splněn.

Výstupní napětí je lineární se změnou výšky hladiny.

Zapojení je závislé na teplotě. Je třeba před měřením nechat zařízení zahřát na provozní teplotu. Při zahřívání zařízení se měřící rozsah nemění. Mění se jeho posun od bodu 0V do záporných hodnot.

Pro další vylepšení měřidla je třeba se zaměřit na teplotní stálost vyhodnocování kapacity sondy. Zejména zavést teplotní kompenzaci zesílení na jednotlivých operačních zesilovačích. Pro snadnější a přesnější změnu rozsahu je třeba zaměnit obyčejné trimery za více otáčkové.

Literatura





- [1] KMÍNEK, Miloš, KADLEC, Karel, ed. Měřicí a řídicí technika. In: *Měřicí a řídicí technika: 4 technologická měření* [online]. Praha [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/>
- [2] Amatérská výroba plošného spoje (DPS) pro symetrický zdroj stejnosměrného stabilizovaného napětí, In: *POSTŘEH.COM* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.postreh.com/phprs/view.php?cislocclanku=2006122802>
- [3] PUNČOCHÁŘ, Josef, 1996. *Operační zesilovače v elektronice*. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 80-901984-3-0.
- [4] RONEŠOVÁ, Andrea, 2003. Převodníky f/U, obvod NE555: Převodník f/U:. In: *Návody k úlohám na cvičeních z +AES* [online]. Plzeň: ZČU v Plzni [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~ronesova/index.php?menuitem=aes_mfu
- [5] Měření hladiny, *Měření hladiny* [online]. Jičín [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorie/snimace_hladiny/teorie-hladina/#obsah
- [6] Válcový kondenzátor, 2006. *Sbírka řešených úloh* [online]. Praha [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://reseneulohy.cz/449/valcovy-kondenzator>
- [7] *Elektrotechnická měření*, 2002. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 978-80-7300-022-6.
- [8] KADLEC, Karel a Miloš, *Měřicí a řídicí technika pro 1. roč. magisterského studia FPBT* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/predn/txt-Mgr/5-FPBT09-Hladina.pdf>

Seznam příloh

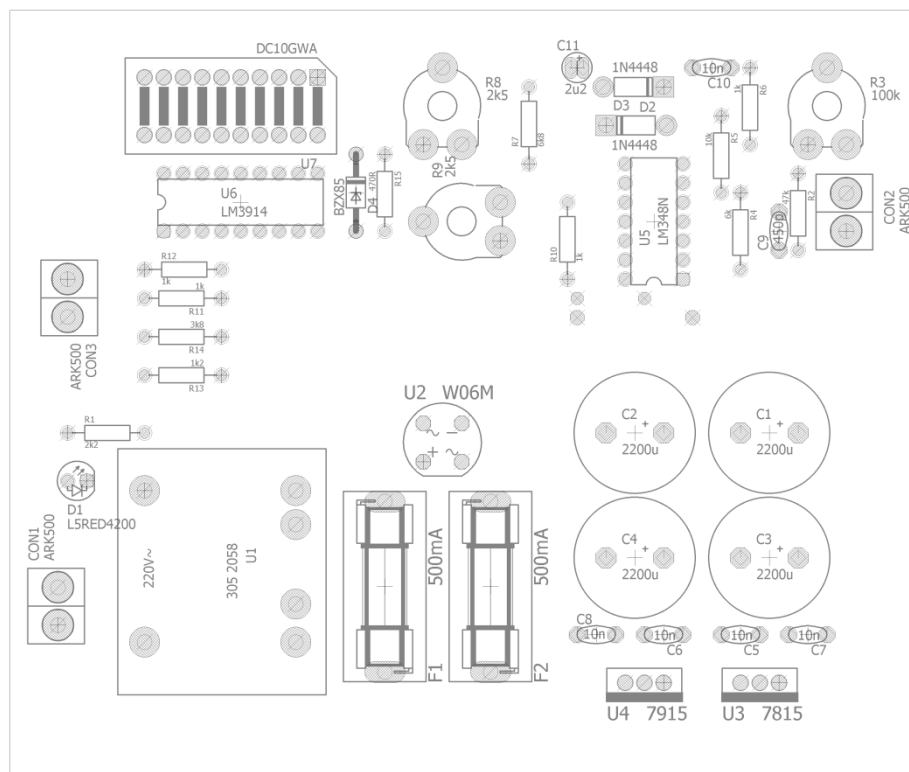
Příloha A:	Rozmístění součástek na desce plošných spojů.....	I
Příloha B:	Deska plošných spojů.....	II
Příloha C	Rozpiska součástek.....	III
Příloha D	Celkové schéma zapojení.....	IV
Příloha E	Blokové schéma obvodu LM3914.....	V

Příloha na CD.

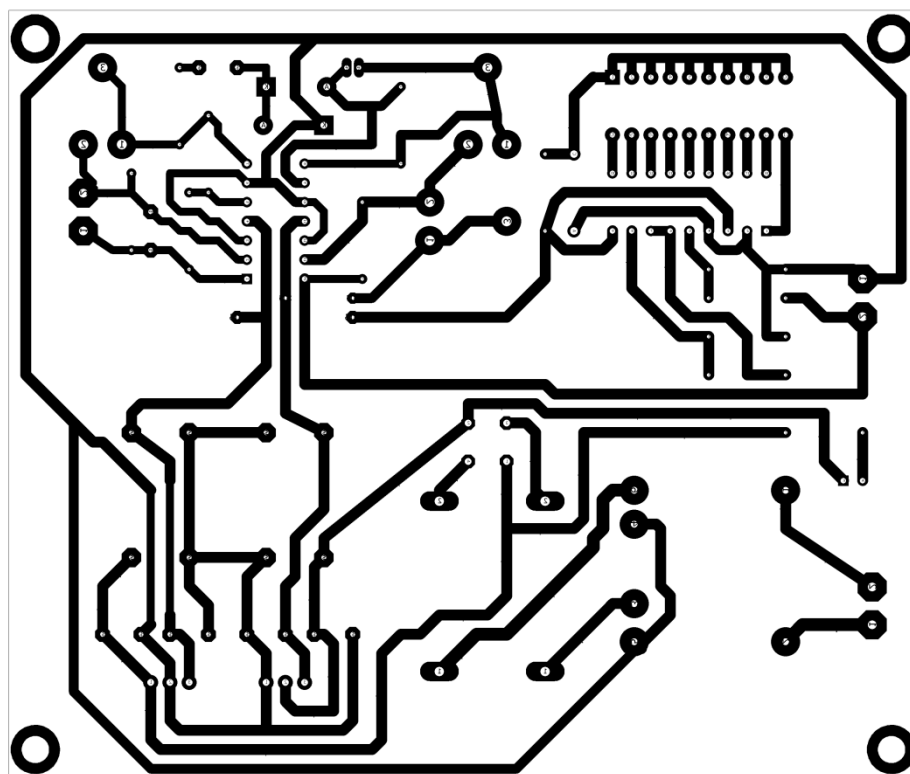
Adresářová struktura přiloženého CD.

-  [Bakalářská práce.pdf]
-  [Eagle]
-  [Obrázky]
-  [OrCAD]

Příloha A: Rozmístění součástek na desce plošných spojů



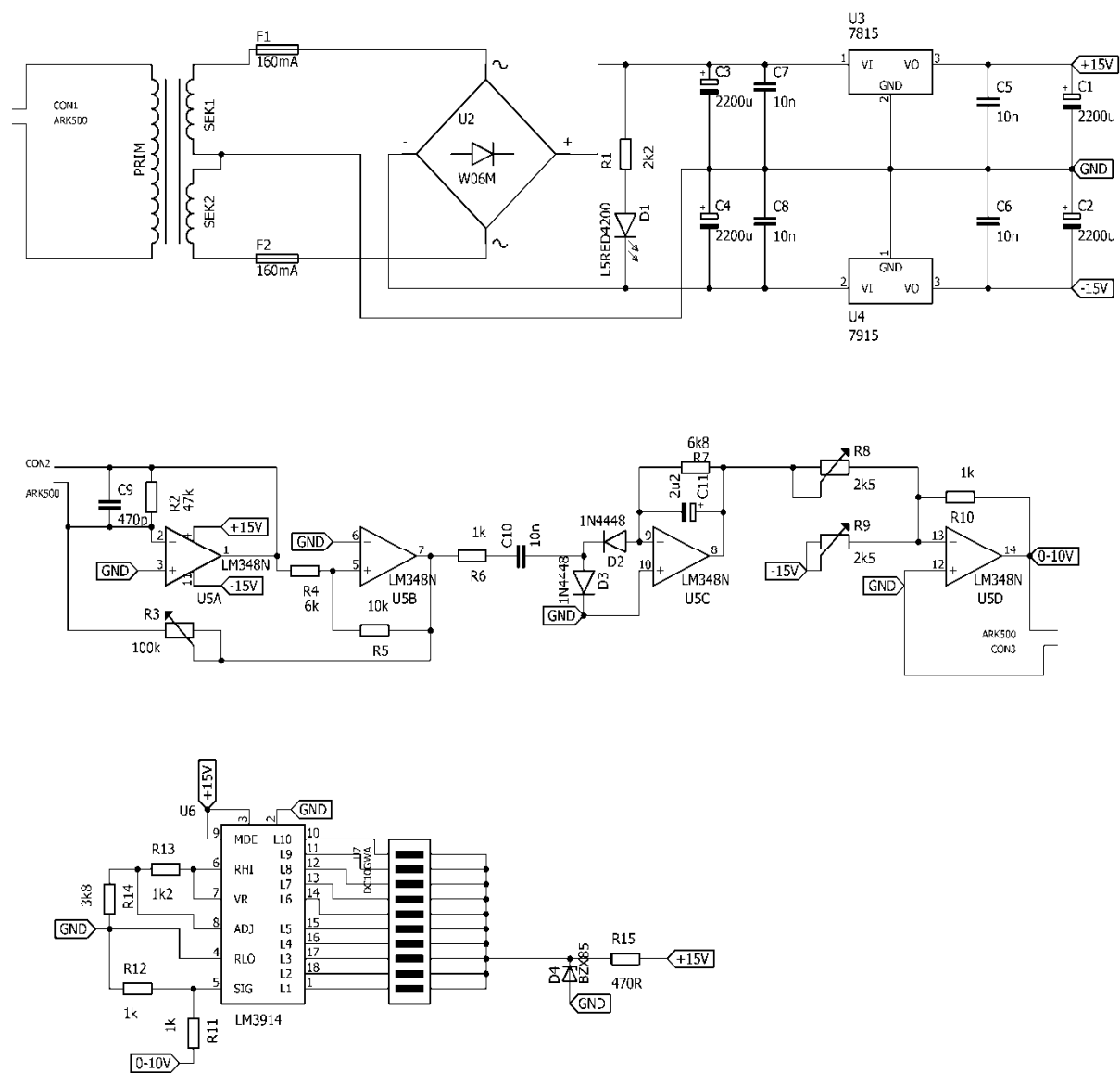
Příloha B: Deska plošných spojů



Příloha C Rozpiska součástek

Součástka	Označení	Hodnota	Součástka	Označení	Hodnota
Rezistor	R1	2k2	Led dioda	D1	L5RED4200
Rezistor	R2	47k	Dioda	D2	1N4448
Rezistor	R3	100k	Dioda	D3	1N4448
Rezistor	R4	6k	Zenerova dioda	D4	BZX85 5V1
Rezistor	R5	10k			
Rezistor	R6	1k	Transformátor	U1	3 052 058
Rezistor	R7	6k8	Diodový můstek	U2	W06M
Rezistor	R8	2k5	Stabilizátor napětí	U3	7815
Rezistor	R9	2k5	Stabilizátor napětí	U4	7915
Rezistor	R10	1k	4x OZ	U5	LM348N
Rezistor	R11	1k	IO	U6	LM3914
Rezistor	R12	1k	Led sloupec	U7	DC10GWA
Rezistor	R13	1k2			
Rezistor	R14	3k8	Konektor	CON1	ARK500
Rezistor	R15	470R	Konektor	CON2	ARK500
			Konektor	CON3	ARK500
Kondenzátor	C1	2200u			
Kondenzátor	C2	2200u	Pojistka	F1	160mA
Kondenzátor	C3	2200u	Pojistka	F2	160mA
Kondenzátor	C4	2200u			
Kondenzátor	C5	10n			
Kondenzátor	C6	10n			
Kondenzátor	C7	10n			
Kondenzátor	C8	10n			
Kondenzátor	C9	450p			
Kondenzátor	C10	10n			
Kondenzátor	C11	2u2			

Příloha D Celkové schéma zapojení



Příloha E Blokové schéma obvodu LM3914

